



**HUGO ADRIANO
CHAVES MAURÍCIO**

**Análise do Processo de Corte a Laser numa
Pequena Empresa Metalomecânica**



**HUGO ADRIANO
CHAVES MAURÍCIO**

**Análise do Processo de Corte a Laser numa
Pequena Empresa Metalomecânica**

Relatório de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica da Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha família.

o júri

presidente

Prof^a. Doutora Ana Raquel Reis Couto Xambre
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António Rodrigues Pereira de Faria
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof^a. Doutora Helena Maria Pereira Pinto Dourado e Alvelos
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Para desenvolver este projeto foi decisivo o apoio recebido de várias pessoas a quem pretendo expressar o meu reconhecimento.

À Prof^a. Doutora Helena Alvelos pela permanente disponibilidade, e pela orientação e apoio à concretização desta dissertação.

Tenho a agradecer também ao Dr. Alexandre Gomes pela seleção para integrar o Departamento de Qualidade da Marsilinox Lda..

Ao Eng^o Daniel Almeida pelos ensinamentos e disponibilidade demonstrada.

Ao Eng^o Luís Rodrigues pela motivação transmitida e pormenores bastante pertinentes, que contribuíram para a minha aprendizagem enquanto estagiário.

Tenho em especial consideração a minha família que me acompanhou e apoiou, no melhor e no pior, do meu percurso académico, bem como todos os meus amigos e colegas da Marsilinox Lda. e da Universidade de Aveiro.

palavras-chave

Qualidade, processos de corte, corte a laser, aço, ferro, parâmetros de corte a laser, ANOVA.

resumo

Este relatório descreve o trabalho desenvolvido no âmbito do estágio curricular em Qualidade e Expedição no departamento de Qualidade da Marsilinox Lda.. O objetivo deste trabalho é propor ações de melhoria para o processo de corte a laser na Marsilinox, nomeadamente para a diminuição dos desvios das cotas das peças produzidas relativamente às especificações. Atualmente esta tecnologia é utilizada nas mais variadas áreas, e, sendo, em algumas indústrias, um dos processos iniciais no fabrico dos produtos, é importante a sua melhoria, como forma de reduzir os custos da não qualidade. Numa primeira fase, foram recolhidas amostras da produção em massa de corte a laser. Seguidamente foram utilizadas metodologias da qualidade para analisar os dados recolhidos e identificar as causas do problema. Foram identificados fatores que potencialmente afetam o desvio referido e foram testados os seus efeitos, utilizando a técnica de Análise de Variância. A partir dos resultados obtidos, foram retiradas conclusões e apontadas algumas sugestões de melhoria.

keywords

Quality, cutting processes, laser cutting, steel, iron, laser cutting parameters ANOVA.

abstract

This report describes the developed work on the internship in Quality and Delivery, in the department of Quality, of Marsilinox Lda..

The objective of this work is to propose actions to improve the process of laser cutting in Marsilinox, notably in reducing the deviations of the dimensions of the parts produced to the specifications.

Currently this technology is used in several areas, and being in the industry, one of the initial manufacturing processes of its products, it is important to improve it in order to avoid higher costs of non-quality.

In a first stage, mass production samples from laser cutting were collected. In a second stage, quality methodologies were used to analyse the data and identify the causes of the problem. Factors that potentially affect the referred deviation are identified and its effects in the laser cutting process were tested, using the Analysis of Variance technique. From the results obtained are taken conclusions and outlined some suggestions for improvement.

Índice de conteúdos

1 Introdução.....	1
1.1 Apresentação da empresa.....	1
1.2 Enquadramento e objetivos do projeto.....	2
1.3 Metodologia	4
1.4 Estrutura do relatório.....	5
2 Enquadramento teórico.....	7
2.1 Melhoria da qualidade.....	7
2.1.1 Ferramentas da Qualidade	8
2.1.2 Teste à normalidade	10
2.1.3 Teste t de Student.....	10
2.1.4 Análise de Variância.....	11
2.1.5 Capacidade do processo.....	11
2.2 Tecnologias de corte	12
2.3 Tecnologia De Corte Laser	13
2.3.1 História e aplicações	13
2.3.2 Laser - Definição e funcionamento.....	16
2.3.3 Composição do laser.....	16

2.3.4 Tipos de laser mais relevantes	18
2.3.4.1 Laser de CO ₂	19
2.4 Fatores que afetam o corte	19
2.4.1 Parâmetros de corte.....	20
2.4.2 Corte a Nitrogénio	21
2.4.3 Corte a oxigénio.....	22
2.4.4 Chapa de alta espessura	22
2.4.5 Corte inclinado.....	23
2.4.6 Lente de foco	24
3 Caso de estudo	27
3.1 Processo Produtivo.....	27
3.1.1 Processo produtivo da Marsilinox	27
3.1.2 Processo produtivo de corte a laser	29
3.2 Descrição das possíveis causas de deficiente qualidade do produto de corte a laser	33
3.3. Manutenção do Laser e Limpeza da Lente	37
4 Resultados e Discussão.....	41
4.1 Análise preliminar dos dados	41
4.1.1 Análise dos Desvios.....	44

4.1.2 Estatísticas dos fatores de corte	46
4.2 Caso pontual de lote não conforme	52
4.2.1 Estatísticas para o caso de um lote não conforme	55
4.3 Caso de uma encomenda produzida em dois lotes	56
4.4 Antes e depois da limpeza de uma lente	58
4.5 Estudo da influência dos fatores selecionados no desvio de corte.....	62
5. Conclusão	67
5.1 Conclusões e Sugestões de melhoria.....	67
5.2 Limitações	68
5.3 Trabalho futuro.....	69
Referências Bibliográficas.....	71
Sites consultados	73

Índice de Figuras

Fig. 1 - Marsilinox	1
Fig. 2 - Ciclo de Deming	7
Fig. 3 - Diagrama de Ishikawa típico	9
Fig. 4 - Sistema de focagem laser	13
Fig. 5 - a, b - Situação de torneamento 3D; c - Fresagem 3D.....	15
Fig. 6 - Esquema do funcionamento de um Ressorador Ótico.....	17
Fig. 7 - Sistema típico de corte laser	17
Fig. 8 - Estrias em superfície de corte	23
Fig. 9 - (a) Corte inclinado, (b) Corte tradicional	24
Fig. 10 - Erosão térmica em superfície de corte	24
Fig. 11 - Fluxograma do processo produtivo da Marsilinox	28
Fig. 12 - Fluxograma do Processo Produtivo de corte a laser	30
Fig. 13 - (a) Chapa nova na posição de corte; (b) Corte a laser em execução ..	31
Fig. 14 - (a) Peças com rebarba, (b) Peças depois de removida a rebarba	32
Fig. 15 - Desenho técnico típico de peça para produção em corte laser. Produto final (a) e produto inacabado no fim deste processo (b).	32
Fig. 16 - Diagrama de Ishikawa para a deficiente qualidade do produto de corte a laser .	33
Fig. 17 - Laser de CO ₂ TRUMFP TruLaser 3030.....	34
Fig. 18 - Lentes de foco	35

Fig. 19 - (a) <i>Stock</i> de chapa na vertical (b) <i>Stock</i> de chapa na horizontal	36
Fig. 20 - Aplicação do líquido na lente(a) e no tecido (b), (c) limpeza da lente	38
Fig. 21 - (a) foco adiantado, (b) foco atrasado, (c) foco centrado	39
Fig. 22 - Formulário de recolha de dados para corte a laser	42
Fig. 23 - Tabela de registo dos níveis	43
Fig. 24 - Histograma dos desvios de todas as amostras	44
Fig. 25 - Gráfico de dispersão do desvio médio em função da especificação....	45
Fig. 26 - Diagrama tipo caixa do desvio de cote em função das categorias de Armazém.....	48
Fig. 27 - Diagrama tipo caixa do desvio em função das categorias de espessura	50
Fig. 28 - Diagrama tipo caixa do desvio em função das categorias de matéria prima	51
Fig. 29- Desenho da peça do lote não conforme e medidas registadas.	52
Fig. 30 - Observações do Comprimento da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias	52
Fig. 31 - Observações da Largura da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias	53
Fig. 32 - Observações da Medida 1 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias	53
Fig. 33 - Observações da Medida 2 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias	53
Fig. 34 - Observações da Medida 2 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias (+/-5%)	54

Fig. 35 - Gráfico relativo aos desvios em dois lotes da mesma encomenda.....	57
Fig. 36 - Gráfico relativo aos desvios antes e depois da 1ª limpeza da lente ...	59
Fig. 37 - Gráfico relativo aos desvios antes e depois da 2ª limpeza da lente ...	60
Fig. 38 - Gráfico dos valores médios para os dois armazéns e as três categorias de espessura consideradas	64
Fig. 39 - Gráfico dos valores médios para as duas matérias primas e as três categorias de espessura consideradas	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Fatores a analisar e respetivos níveis	43
Tabela 2 - Correlação entre especificação e desvio	46
Tabela 3 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Armazém	47
Tabela 4 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Espessura	49
Tabela 5 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Matéria Prima	50
Tabela 6 - Estatísticas descritivas relativas à amostra das peças INVAR	55
Tabela 7 - Testes à Normalidade da distribuição das variáveis referentes às dimensões da peça INVAR	55
Tabela 8 - Índices de capacidade do processo para amostra da peça INVAR.....	56
Tabela 9 - Estatísticas dos grupos.....	58
Tabela 10 - Teste t à diferença de médias entre os desvios dos dois lotes da mesma encomenda.....	58
Tabela 11 - Estatísticas dos grupos.....	59
Tabela 12 - Teste t à diferença entre as médias dos desvios de dois lotes produzidos antes e depois da 1ª limpeza de lente.....	60
Tabela 13 - Estatísticas dos grupos.....	61
Tabela 14 - Teste t à diferença de médias entre os desvios de dois lotes produzidos antes e depois da 2ª limpeza de lente.....	61
Tabela 15 - Fatores e níveis consideradas para a ANOVA	62
Tabela 16 - Grupos de dados com observações.....	63

Tabela 17 - ANOVA	63
-------------------------	----

1 Introdução

Este relatório apresenta o projeto desenvolvido na empresa Marsilinox, no âmbito da disciplina Estágio/Projeto/Dissertação do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, da Universidade de Aveiro.

O projeto consistiu na análise do processo produtivo de corte a laser da empresa.

O estágio iniciou-se em Setembro de 2013 e teve 9 meses de duração.

1.1 Apresentação da empresa

O estágio decorreu na Marsilinox Indústria Metalúrgica Lda. (Fig. 1), situada em Vale de Cambra. Esta é uma pequena empresa metalomecânica que tem crescido nos últimos anos devido às suas fortes componentes, comercial e técnica.



Fig. 1 - Marsilinox

Retirado de: www.marsilinox.pt

A sua política de trabalho é orientada para a satisfação do cliente, onde é privilegiado o cumprimento dos requisitos dos acordos com os clientes. Esta passa ainda pela aposta na qualidade do produto final e na segurança no trabalho. Para cumprimento e manutenção destas áreas, a empresa procura apostar nas tecnologias mais recentes, que geralmente ofereçam boas opções. A Marsilinox aposta ainda na melhoria contínua do seu desempenho organizacional, como tal, possui um sistema de gestão da qualidade certificado segundo a norma NP EN ISO 9001: 2008.

Do seu leque de serviços fazem parte a punção de chapa, corte e gravação a laser, soldadura, quinagem e esmerilamento. A sua produção é muito variada, pois é uma empresa que trabalha à encomenda. Esta inclui desde pequenas peças, como flanges e anilhas, até produtos de maiores dimensões, como fornos industriais e estruturas metálicas. Os seus produtos são destinados às áreas da construção civil, alimentar, automóvel, eletrónica, manutenção industrial, entre outros.

Atualmente exporta mais de metade da sua produção, sendo a França o seu principal destino. Os produtos são requisitados maioritariamente para projetos de construção e manutenção de unidades fabris de empresas, como a Coca Cola e a Panrico.

Departamento de Qualidade

O estágio teve lugar no departamento de Qualidade, na secção de Qualidade e Expedição. Dentro da empresa, esta é a área responsável pelo controlo de qualidade, ou seja, pela inspeção final do produto acabado e integração das informações recolhidas no sistema de gestão da qualidade. É ainda responsável pela logística da entrega do produto ao cliente.

1.2 Enquadramento e objetivos do projeto

A tecnologia laser é utilizada em diversas áreas, como a saúde e a indústria. Na área industrial, esta tecnologia é frequentemente usada no corte de chapa metálica, sendo que, é comum o processo de corte a laser produzir efeitos não desejáveis no produto. Alguns destes efeitos são a criação de rebarba, estrias, e, o aumento da fenda de corte. Estes efeitos, não desejáveis, podem originar não conformidades, dependendo da sua intensidade e frequência de incidência, ou seja, um elevado número de estrias na superfície de corte, existência de rebarba no produto, ou medidas das peças que ultrapassam as tolerâncias da especificação, originam produção defeituosa e, conseqüentemente, reclamações dos clientes. Assim, no que diz respeito ao corte a laser, pretende-se minimizar estes efeitos.

Atualmente o fabrico metalomecânico conta com o apoio de tecnologia variada, que assiste a produção. A Marsilinox possui máquinas programáveis automáticas que funcionam segundo os conceitos "Computer Aided Machinery" e "Computer Numerical Control", bem como ferramentas mais específicas para mandrilagem e acabamentos. Na

Marsilinox grande parte das encomendas passa inicialmente por processo de corte (onde se insere o processo de corte a laser), antes de avançar para os processos seguintes, em caso de produção de produto inacabado.

Segundo Ganhão (1988), no que diz respeito aos custos da não qualidade, as empresas devem optar preferencialmente por custos de prevenção, que se inserem em projetos para redução dos restantes custos, e, segundo notas de apoio à disciplina de Gestão da Qualidade (2011), quanto mais cedo se identificam não conformidades, menores são os custos da não qualidade. Nesta lógica a aposta no bom funcionamento dos processos de corte, pode poupar recursos que de outro modo seriam gastos como custos da não qualidade, e, um projeto nesta temática seria benéfico para a empresa.

O corte defeituoso ou fora dos limites de tolerância, torna o produto inacabado, incompatível com os requisitos dos processos de fabrico seguintes. Na empresa este aspeto era muito observado no processo de soldadura, em que as peças a soldar por vezes, não coincidiam exatamente com o espaço que lhes era reservado, na posição de soldadura. Quer as correções internas, de produtos não conformes identificados em inspeção, quer as respostas a reclamações, consistem tipicamente em nova produção ou recuperação do produto. Isto contabiliza custos de falhas internas, nomeadamente no uso de recursos como a mão de obra e a matéria prima, e de falhas externas, traduzidas em gastos com o tratamento das reclamações, que não acrescentam valor ao produto final. Além disso, quando os padrões de exigência do cliente não são conseguidos, a empresa perde também na sua imagem enquanto fornecedor (Ganhão, 1988).

Objetivos

Este trabalho pretende ajudar a empresa a melhorar a qualidade do corte a laser para fabrico de peças. Os objectivos principais passam por identificar as causas dos desvios de corte das peças produzidas, relativamente à especificação no desenho técnico e, recorrendo a técnicas estatísticas, para análise de dados, investigar as causas dos desvios de corte e sugerir ações que melhorem o processo. Espera-se assim que as sugestões de melhoria ajudem a Marsilinox a reduzir os desvios de corte, que por sua vez, deve conduzir a uma redução nos casos de material não conforme, proveniente exclusivamente do corte a laser, o que por sua vez deve reduzir os custos de falhas internas e externas da empresa.

1.3 Metodologia

O método de trabalho para este projeto passa por 4 etapas:

1. Pesquisa e análise de literatura científica sobre corte a laser.
2. Recolha de amostras para controlo de qualidade.
3. Aplicação de técnicas estatísticas aos dados recolhidos da produção.
4. Análise crítica de resultados e sugestão de melhorias.

A primeira fase inclui a pesquisa sobre o funcionamento típico de um laser durante o processo de corte. Já a pesquisa e análise de literatura científica, sobre os fatores que influenciam o corte e sobre métodos estatísticos de análise de dados, deve assistir a interpretação dos resultados deste relatório.

A segunda etapa refere-se ao trabalho de recolha de amostras à saída da máquina de corte a laser, durante a inspeção para controlo de qualidade. Os lotes utilizados neste estudo são exclusivamente de chapa de ferro ou aço para produto final, preferivelmente da produção em larga escala de pequenas peças. A dimensão amostral por lote não foi predefinida com nenhum critério, devido a variabilidade das quantidades encomendadas. A recolha amostral é toda aleatória simples e varia entre 20 e 50 unidades recolhidas por lote.

Na terceira fase é feito o tratamento dos dados. No momento da recolha de cada amostra, efetuavam-se os registos num formulário de recolha de dados elaborado para tal. A informação era posteriormente tratada no excel, para análise dos desvios de corte em relação à especificação do desenho. Aqui verificava-se também o cumprimento dos limites de tolerância para cada lote, com vista a identificar não conformidades. Também para tratamento de dados foram utilizadas as técnicas estatísticas consideradas adequadas.

Finalmente, na última etapa, e com base no trabalho desenvolvido nas fases anteriores, são formuladas conclusões e propostas de trabalho futuro que possam vir a ajudar a empresa na melhoria da qualidade dos seus produtos.

1.4 Estrutura do relatório

O presente relatório, intitulado "**Análise do Processo de Corte a Laser numa Pequena Empresa Metalomecânica**" está dividido em 4 capítulos.

O primeiro capítulo, que agora se conclui, é a introdução, onde numa primeira fase, se faz uma breve apresentação da empresa e da sua envolvente. Numa segunda fase, é feito um enquadramento do corte a laser na atualidade e da situação na empresa, onde se apresenta o problema e o objetivo do trabalho a desenvolver. Numa terceira fase, apresentam-se as linhas gerais da metodologia seguida neste projeto e a apresentação da estrutura do relatório, como é o caso.

O segundo capítulo é o enquadramento teórico. Este subdivide-se em metodologias da qualidade e tecnologias de corte. Na primeira parte são explicados resumidamente os conceitos da área da Qualidade considerados mais pertinentes para o trabalho, e na segunda parte, aborda-se o funcionamento do processo corte a laser e os fatores que afetam o processo, mais relevantes para este caso de estudo.

No terceiro capítulo apresenta-se o caso de estudo, onde se descreve o processo de fabrico geral da empresa e o processo de corte a laser, em particular, seguindo-se uma análise dos fatores que afetam o mesmo processo de corte. Em ambos os casos se recorre a ferramentas da qualidade.

O quarto capítulo contém a aplicação das metodologias da qualidade e análises dos seus resultados. Numa primeira fase é efetuada uma análise estatística preliminar a cada fator e aos desvios registados, seguindo-se a descrição e análise de um caso pontual de um lote não conforme. Por fim analisam-se os efeitos dos fatores que influenciam o corte, descritos no capítulo anterior, através de uma análise de variância. Usam-se ainda testes *t* de "Student" para averiguar a significância das diferenças antes e depois de limpezas de lente efetuadas, e entre as amostras de dois lotes da mesma encomenda.

O quinto capítulo inclui as principais conclusões retiradas dos resultados, uma descrição das limitações e obstáculos encontrados na elaboração do trabalho, propostas de ações e melhoria, e sugestões de trabalho futuro.

2 Enquadramento teórico

2.1 Melhoria da qualidade

Hoje em dia a Qualidade e a Engenharia do Processo estão cada vez mais interligadas e a trabalhar com o mesmo objetivo, a melhoria contínua. Esta é essencial para o desenvolvimento de qualquer organização, na medida em que permite identificar causas de produto não conforme e de processos ou serviços ineficientes. O tratamento destas causas, numa ótica de melhoria contínua, traduz-se por sua vez em redução de custos. De seguida descreve-se uma ferramenta muito aplicada na melhoria contínua, nomeadamente o ciclo de "Deming".

Ciclo de Deming

Uma das metodologias mais usadas no contexto da melhoria contínua é o ciclo de Deming, também designado de ciclo PDCA. Este consiste em 4 etapas nomeadamente: Planear, Executar, Verificar e Agir (Imae, 1997), como se representa na Fig. 2.

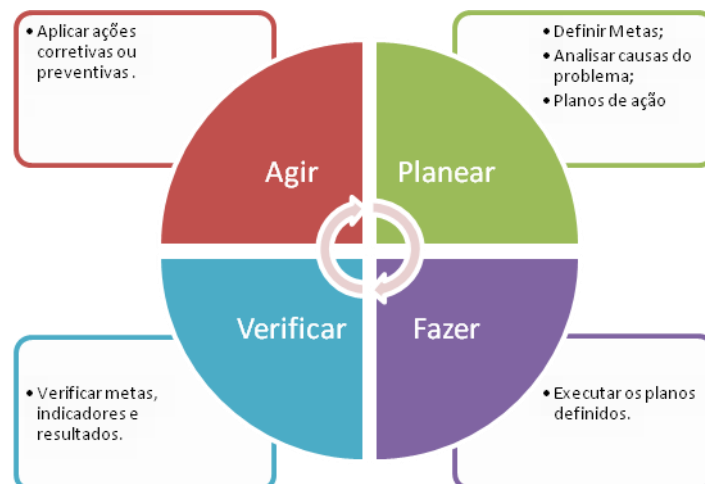


Fig. 2 - Ciclo de Deming

(Adapado de: <http://www.sobreadministracao.com/o-ciclo-pdca-deming-e-a-melhoria-continua/>)

Este ciclo inicia-se numa fase de análise do problema. Aqui, na fase "Planear", analisam-se as causas do problema e definem-se planos de ação, que ao serem aplicados devem atingir determinadas metas, também elaboradas nesta fase. Na seguinte fase, designada de "Fazer", executam-se os planos definidos na etapa anterior e recolhem-se dados. Aqui o envolvimento da organização é essencial, e para isso, também o é, a comunicação e instrução sobre os procedimentos. Já na terceira fase, designada de "Verificar", analisam-se os dados recolhidos e verifica-se o balanço do desempenho com as novas medidas. Os resultados são avaliados através de indicadores de desempenho e do cumprimento das metas definidas. Na última fase do ciclo, designada de "Agir", determinam-se, consoante a avaliação de desempenho, onde se aplicam definitivamente as mudanças para melhoria do processo. No caso de avaliação ser negativa, aplicam-se ações corretivas, ou preventivas, e inicia-se um novo ciclo. Caso a avaliação tenha sido positiva, padronizam-se os procedimentos planeados (Imae, 1997; www.sobreadministracao.com).

Seguidamente serão abordadas técnicas e ferramentas que foram utilizadas na parte prática do trabalho, sendo elas as Ferramentas da qualidade, o Teste à normalidade de uma distribuição, o teste t de "Student", a Análise de Variância e a Análise da Capacidade do Processo.

2.1.1 Ferramentas da Qualidade

As 7 ferramentas da qualidade são um conjunto de ferramentas básicas, mas muito úteis para o tratamento e interpretação de dados (Evans e Lindsay, 2010). Destas ferramentas são brevemente descritas as que são utilizadas neste trabalho:

1. Fluxogramas - Esta é a ferramenta mais usada para representar processos produtivos serviços ou procedimentos. Usando caixas circulares para o início e fim do processo, caixas retangulares para as diferentes etapas e losangos para situações de decisão, entre outros, é possível construir uma cadeia lógica de etapas e de fácil interpretação visual.

2. Diagrama de Ishikawa - É muito usado para representar aspetos que influenciam determinado processo. São também designados diagramas "causa-efeito" já que procuram definir as causas de determinado problema.

Tipicamente as potenciais causas de um problema enquadram-se em 5 categorias principais: equipamento, matéria prima, mão de obra, método e ambiente; estas podem ser observadas na Fig. 3, onde se representa um diagrama de Ishikawa típico.

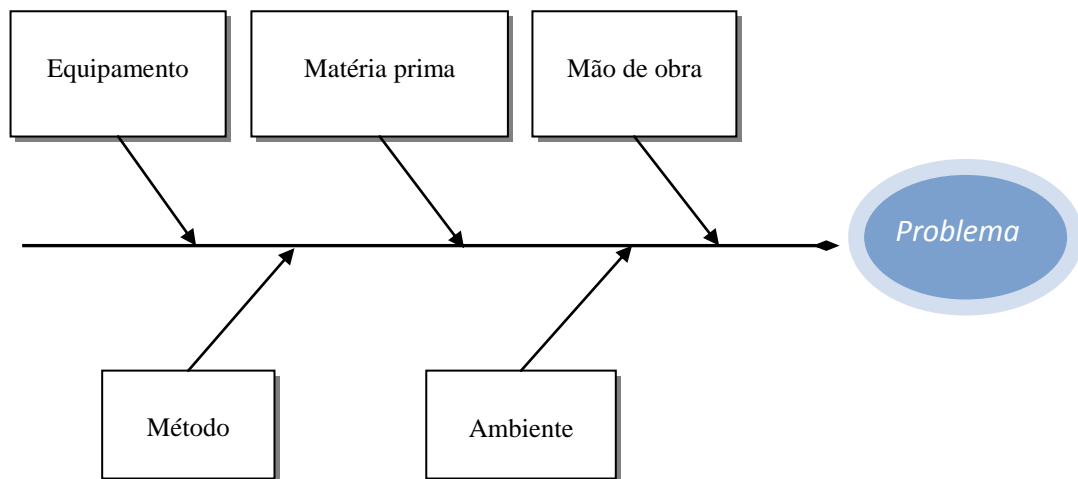


Fig. 3 - Diagrama de Ishikawa típico

(Adapado de: <http://www.sobreadministracao.com/o-ciclo-pdca-deming-e-a-melhoria-continua/>)

3. Formulários de recolha de dados - Este tipo de formulário é tipicamente usado para registar ocorrências de não conformidades, como por exemplo, o número de defeitos por peça ou número de peças defeituosas num lote de produção. A sua utilização estende-se no entanto, à recolha de qualquer tipo de dados, sendo que, o formulário a utilizar depende das variáveis que se pretendem analisar.

4. Histogramas - É a forma de representação gráfica mais comum. Permite a visualização de frequências absolutas ou relativas em gráficos de barras, para grupos de informação ou variáveis.

5. Gráficos de tendência e de dispersão - Os gráficos de tendência representam pontos ligados, para análises de variáveis ao longo do tempo ou ao longo de um processo.

Os gráficos de dispersão representam os pontos que relacionam geralmente duas (ou mais) variáveis, colocando nesta representação, uma em função da outra.

2.1.2 Teste à normalidade

Um teste à normalidade serve para verificar se uma população pode ser bem modelada por uma distribuição normal (Gaussiana).

Este teste é útil para validar a utilização de outras ferramentas. A normalidade dos resíduos de um grupo de dados é necessária, se é pretendida uma análise de variância desse mesmo grupo, caso contrário a mesma não é válida. Outro exemplo são os modelos de regressão linear, em que esta, normalidade dos resíduos, permite que os resultados do modelo sejam de confiança.

A normalidade é avaliada, neste relatório, com recurso ao teste de Kolmogorov-Smirnov e utilizando a tabela desenvolvida por Liliefors (Maroco, 2003; Guimarães e Cabral, 2007).

2.1.3 Teste t de Student

Os testes de hipóteses t realizados no âmbito deste trabalho referem-se à diferença de médias entre duas populações independentes, sendo as hipóteses as seguintes:

H_0 – Não existe diferença entre as médias da característica em análise para as duas populações.

H_1 – Existe diferença entre as médias da característica em análise para as duas populações.

Segundo Maroco (2003), no caso de a hipótese nula ser verdadeira, a estatística de teste segue uma distribuição t de "Student", sendo que decisão de rejeição, ou não, desta hipótese é tomada com base na comparação entre o valor de prova e o nível de significância pretendido para o teste (habitualmente, de 5%).

2.1.4 Análise de Variância

A Análise de Variância (ou ANOVA) é uma técnica estatística que permite comparar médias entre mais do que duas populações. O teste usado é o do quociente de variâncias (teste F), utilizando a estimativa da variância baseada na variação entre as médias das amostras (variação entre os grupos) e a estimativa baseada na variação dentro das amostras (variação dentro dos grupos) (Murteira e Antunes, 2012; Moore e McCabe, 1993).

A análise permite relacionar a variabilidade das observações com os fatores causadores dessa variabilidade, sendo possível identificar quais os fatores estatisticamente significativos. A ANOVA pode ser a um fator, quando se analisam efeitos provocados por um único fator, e a vários fatores quando os efeitos analisados podem ser provocados por vários fatores (ou pelas suas interações). A análise de variância possui os seguintes pressupostos relativamente aos erros (Maroco, 2003; Guimarães e Cabral, 2007):

1. Normalidade da sua distribuição;
2. Homogeneidade da sua variância;
3. Independência mútua;

2.1.5 Capacidade do processo

A capacidade do processo pode ser avaliada por um índice de capacidade do processo, representado por " C_p ". Este índice serve para avaliar se o processo atua dentro de determinados limites. O " C_p " é calculado como a divisão da variação permitida pela variação real (Wetherill e Brown, 1991), ou seja:

$$C_p = (LSE - LIE) / 6\sigma; \text{ sendo LSE, o Limite Superior de Especificação, LIE, o Limite Inferior de Especificação e, } \sigma, \text{ o desvio padrão do processo;}$$

Habitualmente, considera-se que um processo é capaz quando o seu índice de capacidade é igual ou superior a 1, não sendo capaz quando é inferior a 1.

Existe ainda o " C_{pk} " que é um indicador que avalia a capacidade, mas considera também o facto de o processo se encontrar ou não centrado, ou seja, indica se os valores da amostra se encontram centrados relativamente aos limites da especificação (Wetherill e Brown, 1991). É calculado pela seguinte expressão:

$C_{pk} = \min\{(\mu - LIE) / 3\sigma, (LSE - \mu) / 3\sigma\}$; sendo " μ " a média e " σ " o desvio padrão do processo;

O processo é centrado se o " C_{pk} " for igual ao " C_p ", caso contrário quanto mais se afastar do valor do " C_p ", mais descentrado será, pois este indicador mede a distância entre a média do processo e o limite de especificação mais próximo.

2.2 Tecnologias de corte

Atualmente a tecnologia de corte é muito variada e a indústria facilmente procura o que mais convém às suas necessidades. Dependendo dos requisitos de corte, do material a cortar, da potência requerida e da precisão, as empresas optam, frequentemente entre as seguintes tecnologias de corte:

- Corte com jato de água
- Corte a plasma
- Oxicorte
- Corte a laser

Sendo o corte a laser objeto de análise deste relatório, seguidamente é comparado com as restantes tecnologias de corte e é descrito, de forma resumida, o seu funcionamento.

Corte a Laser

O corte a laser consiste no foco de radiação num ponto preciso, para atingir altas temperaturas, enquanto em oxicorte e corte a plasma são queimados gases específicos, sendo que, em oxicorte se atingem temperaturas superiores devido ao uso de oxigénio como comburente e acetileno como combustível. O corte com jato de água, consiste geralmente no uso de água com abrasivo, sob pressão, para cortar matéria prima.

Tipicamente um laser é focado através de uma lente convexa e um díodo emissor de laser de cor vermelha é usado para detetar/definir o foco do feixe na superfície a cortar (Golnabi e Bahar, 2009). O material é assim derretido e removido por ação de um gás de

assistência. Este gás é selecionado de acordo com o material a cortar e a distância focal depende da lente em uso.

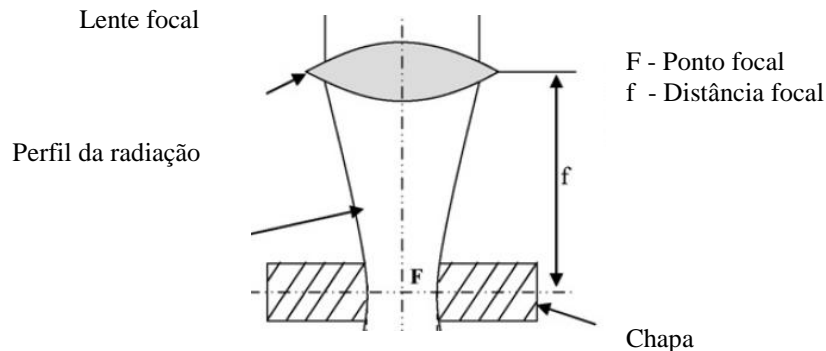


Fig. 4 - Sistema de focagem laser
(Adaptado de: Dubey e Yadava, 2008)

A Fig. 4 representa um sistema de focagem, existente em qualquer máquina de corte a laser. No entanto a arquitetura dos sistemas de corte, a gama das tecnologias e a alimentação da máquina variam consoante o tipo de corte pretendido. Sendo o corte a laser o alvo deste trabalho, esta tecnologia é melhor abordada de seguida, na secção 2.3.

2.3 Tecnologia De Corte Laser

2.3.1 História e aplicações

Em 1930 já existiam as técnicas óticas e o conhecimento teórico para o desenvolvimento da tecnologia, no entanto a incerteza e a falta de apoios atrasaram o casamento entre as mesmas. Em 1950 surgiu então apoio à ideia, e Charles Townes, da universidade da Califórnia, conseguiu conciliá-las em 1951. Já em 1954, em conjunto com o seu aluno James P. Gordon, apresentava a máquina resultante da ideia. Chamada de "MASER" ou seja "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", era a primeira fase do que este pretendia apresentar ao mundo num futuro próximo. Foi então em 1957 que o primeiro aparelho da tecnologia Laser foi criado por Townes e Shawlow (www.aip.org). Este era constituído por um gerador de radiação de estado sólido de rubi. Desde então a evolução da tecnologia tem sido contínua e veio revolucionar o mundo. A crescente necessidade de corte de materiais a nível mundial impulsionou a investigação e o

investimento nesta área. Atualmente existem lasers de estado sólido, líquido e gasoso, sendo que cada uma destas tecnologias apresenta características fortes, quando aplicada a determinado fim, bem como para cada um destes estados da matéria podem ser utilizadas diversos materiais estimuladores para gerar radiação.

Esta tecnologia tem enormes potencialidades. Em termos de capacidade axial, o laser 1D é usado para perfurar, o laser 2D para perfurar, cortar e soldar e o laser 3D pode perfurar, cortar, soldar, fresar e tornear.

Existem duas formas de executar furos em chapa. Furo por desenho, que envolve o corte da circunferência que constitui o furo, e perfuração, em que o laser perfura sem qualquer tipo de movimento em relação à chapa.

Em perfuração a laser facilmente se identificam três zonas de corte. A superfície de perfuração é a zona de formação de estrias, a saída da perfuração é a zona de formação de escória, que forma a rebarba, e a entrada da perfuração é a zona mais afetada termicamente (Yilbas, 1997). Também no corte laser se identificam 3 zonas semelhantes, embora neste caso, estas tipicamente apresentem menos deformações.

O laser tem ainda potencial para executar micro corte. O micro corte é definido como o corte para especificações inferiores a um milímetro. O laser é a ferramenta mais adequada para esta situação. Segundo Baumeister *et al.* (2006) este tipo de corte atinge a sua melhor qualidade com o oxigénio.

Os restantes processos podem mostrar alguma complexidade quando são requisitados a três dimensões. Neste caso, por vezes, é necessário o uso de dois emissores de radiação laser em simultâneo, para fresar e tornear (Dubey e Yadava, 2008), como é representado na Fig. 5.

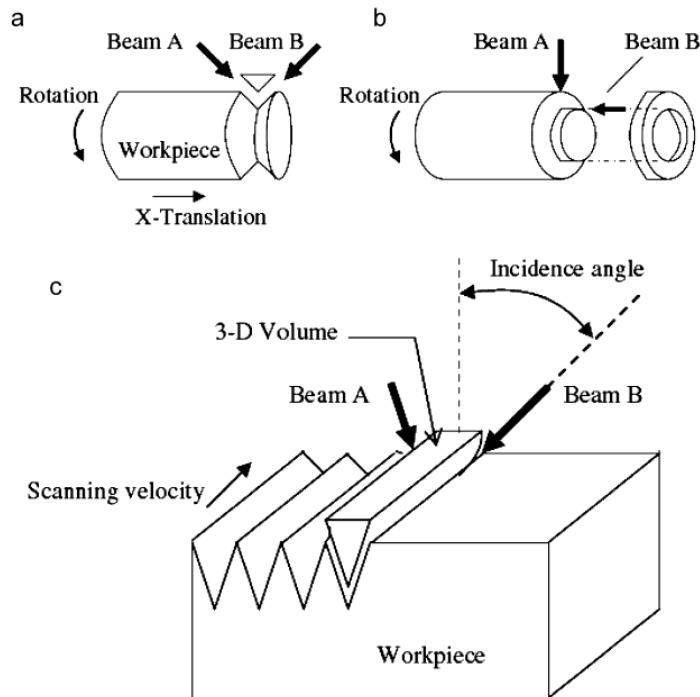


Fig. 5 - a, b - Situação de torneamento 3D; c - Fresagem 3D

(Retirado de: Dubey e Yadava, 2008)

No geral as vantagens competitivas desta tecnologia são a flexibilidade das condições de corte, elevada qualidade do produto final, reduzida zona de afetação térmica (ZAT) e a não existência de contacto mecânico entre a ferramenta de corte e a matéria prima a processar. Deste modo o material evita tensões de processamento, vibrações de máquina e danos físicos. Para além disso o processo não está condicionado a ferramentas estragadas ou limitado à força máxima da ferramenta, como acontece noutros casos.

O campo de aplicação da tecnologia laser é muito vasto. Inclui aplicações medicinais e terapêuticas, biomedicina e medicina forense no campo da saúde. Na área industrial e social é aplicada em processamento de materiais, processamento de imagem e informação, lazer e entretenimento.

O corte a laser, a abordar neste trabalho, é utilizado em processamento de materiais, que é uma das grandes áreas da indústria, no que diz respeito a aplicação desta tecnologia. Esta inclui desde a fabricação de componentes para a indústria automóvel, aeronáutica e construção civil, até pequenas peças para protótipos, ferramentas e eletrónica.

2.3.2 Laser - Definição e funcionamento

LASER é acrónimo de "Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation". Este denomina um feixe coerente e amplificado de radiação eletromagnética, que difere da luz comum por possuir fótons da mesma frequência, comprimento de onda, estado energético e por se propagar unidirecionalmente. A radiação percorre o espaço como onda, mas ao encontrar matéria tem o comportamento de partículas de energia, denominadas fótons. Outra propriedade interessante da luz é que não possui volume e os seus fótons não possuem carga. Desta forma fótons podem ser concentrados no mesmo ponto sem necessidade de considerar espaço ou forças repulsivas (www.troteclaser.com; Meijer, 2004).

Os fótons da radiação visível não possuem energia suficiente para partir ligações químicas em material, embora existam máquinas de corte a laser estimuladas para o comprimento de onda da radiação visível, capazes de fazer gravação em matéria prima (www.photonics.com). No desenvolvimento da tecnologia, o maior desafio foi elevar o nível de energia dos fótons para partirem eficazmente ligações químicas. Atualmente existem várias formas de estimular radiação, que permitem aumentar a energia dos fótons nesse sentido. Já no material a cortar existem eletrões livres que absorvem os fótons da radiação estimulada. Este processo liberta energia térmica e derrete o material efetuando o corte (Meijer, 2004; www.photonics.com).

2.3.3 Composição do laser

Para a produção de um feixe de laser é essencial sistema de focagem, já mencionado anteriormente, e método de estimulação. Um equipamento de focagem básico contém pelo menos uma cabeça de foco, com um díodo e uma lente de foco (News update, 1996). O método de estimulação depende do tipo de laser em causa, ou seja, depende do estado físico do material de estimulação, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. O processo de estimulação decorre dentro de um ressoador ótico (Fig. 6) cujo sistema base apresenta poucas variações quando se comparam os três tipos de laser. A matéria usada para amplificar a radiação é disposta entre 2 espelhos, sendo que um espelho deve ser completamente refletor, enquanto o outro deve ser parcialmente refletor para permitir saída

da radiação estimulada para a cabeça de foco. Uma fonte de radiação deve emitir radiação para o ressoador ótico, para que continuamente e por sucessivas reflexões entre os espelhos, a radiação ao passar pela matéria estimuladora, atinja o estado desejado de estimulação (www.esab-cutting.com).

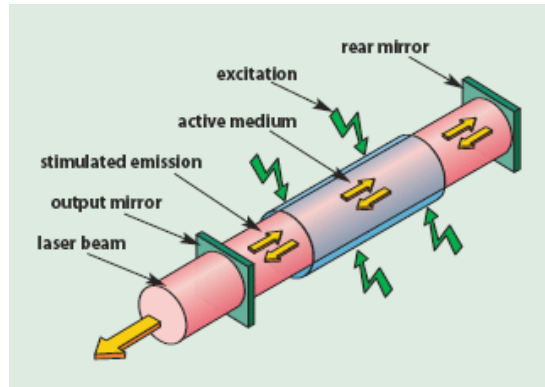


Fig. 6 - Esquema do funcionamento de um Ressorador Ótico
(Retirado de: www.photonics.com)

O material estimulador da radiação é designado de meio de ganho. Na bibliografia é frequentemente referido como "active medium" ou "gain medium". Um aparelho típico de tecnologia laser contém ainda, uma mesa para posicionamento da matéria prima, e espelhos para direcionar o feixe de laser, bem como os respectivos consumíveis para alimentação do ressoador e da cabeça de foco. A matéria a trabalhar é fixa na mesa por meio de ventosas, presilhas, grampos ou ímãs (www.esab-cutting.com).

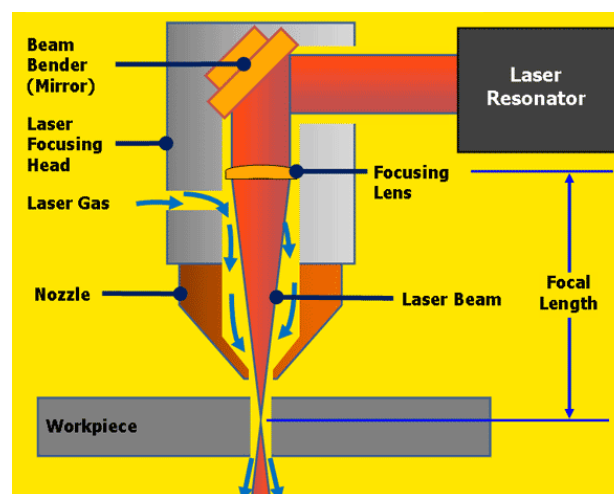


Fig. 7 - Sistema típico de corte laser
(Retirado de: www.esab-cutting.com)

Na Fig. 7 pode ser observado o sistema de corte a laser típico, com ressoador ótico e sistema de focagem em matéria prima. Pode ainda observar-se que, a radiação é refletida do ressoador para a lente de foco por um espelho na cabeça de foco. É também nesta cabeça que é injetado o gás de assistência durante o corte. A última peça da cabeça de foco é o bocal, que limita a fenda de corte a nível físico, como elemento gargalo e permite também direcionar o gás de assistência para a dita fenda, de forma a acompanhar o fluxo de radiação.

Os gases de assistência fazem parte do conjunto de consumíveis da máquina. Estes têm como função a remoção do material da fenda de corte, ainda que existam outras formas de efetuar esta remoção, como por exemplo usando vácuo. Esta opção aumenta a flexibilidade do corte uma vez que elimina a necessidade de bocal quando comparado com o corte comum (Ozaki, 2012).

2.3.4 Tipos de laser mais relevantes

Apresentam-se agora as principais diferenças entre duas das tecnologias de corte a laser mais usadas e distinguem-se as suas principais características.

Os **lasers de CO₂** são lasers de estado gasoso usados para corte, perfuração e gravação. Esta categoria de laser apresenta a melhor eficiência e produz um feixe de laser de boa qualidade e adequado a **corte a altas velocidades**.

Os **lasers Nd:YAG** são lasers de estado sólido que usam cristais de neodímio para estimular radiação. São usados em corte, soldadura, gravação e marcação de metais e plásticos. Têm potência de feixe reduzida mas quando operados em modo intermitente atingem potências extremamente altas. São por isso mais usados em casos que requerem alta potência como o **corte de elevadas espessuras** (Dubey e Yadava, 2008; www.troteclaser.com).

Para este trabalho, são recolhidos registos do corte de um laser de CO₂, como tal, de seguida descreve-se o funcionamento desta tecnologia.

2.3.4.1 Laser de CO₂

Os lasers de CO₂ têm no seu ressoador ótico um tubo de vidro com CO₂, Hélio e por vezes Nitrogénio, sendo que o Hélio é o gás presente em qualquer laser de estado gasoso. A molécula triatómica de CO₂ experiencia 3 tipos de vibrações distintas nas suas ligações covalentes, que permitem a estimulação da radiação para o estado pretendido. O tubo do ressoador pode conter um eletrodo para efetuar descargas elétricas na mistura gasosa ou pode ser alimentado por radiação de frequência rádio (www.laserfocusworld.com).

No ressoador, a radiação é direcionada por um sistema de 2 espelhos, em que um é 100% refletor e o outro é apenas 70%, o que permite estimular radiação, enquanto parcialmente, alguma radiação é continuamente enviada para o sistema de focagem para efetuar corte.

Os gases do ressoador têm de ser continuamente substituídos, pois com a estimulação contínua as moléculas desagregam-se. O tubo do ressoador pode ser disposto ao longo do fluxo (longitudinal) de radiação ou na transversal. É comum o uso na longitudinal, no entanto na transversal e com impulsos de radiação (modo intermitente) é possível atingir potências mais elevadas (www.troteclaser.com).

2.4 Fatores que afetam o corte

Como foi explicado na introdução, o processo de corte a laser, apesar da boa qualidade de corte, cria frequentemente efeitos indesejáveis como criação de rebarba, ou seja, a formação de aglomerados de escória na aresta inferior do produto, e a criação de estrias ou ondulações na superfície de corte. A zona de afetação térmica do feixe de laser é também um efeito abordado na bibliografia. Este embora não seja um efeito visível, que diminua a qualidade do produto, é importante para compreender o comportamento de alguns fatores de entrada do processo. O efeito do aumento da fenda de corte é também não desejável, sendo que a fenda de corte é a espessura de corte efetuada pela radiação laser e quanto maior a fenda, mais as medidas do produto se afastam da especificação, o que pode originar não conformidades.

A fenda de corte real é analisada neste trabalho através do desvio de corte produzido pela máquina. Este é calculado pela subtração do valor da especificação pelo valor das observações da amostra recolhida, para a respetiva cota ou medida da peça em causa.

Os efeitos anteriormente mencionados são algumas respostas do processo face aos fatores de entrada. Muitos fatores de entrada do processo têm vindo a ser estudados por autores como Yilbas (1995), Cekic (2014) e Chen (1999) nomeadamente as tecnologias usadas, as matérias primas, a espessura da chapa metálica a cortar, e parâmetros de corte (apenas alteráveis na máquina), para que seja possível conhecer os efeitos dos fatores que influenciam o corte e suas combinações. Seguidamente descrevem-se os efeitos dos fatores, tipo de matéria prima e espessura da chapa, bem como dos parâmetros de corte, tipo e pressão de gás, velocidade e potência de corte e algumas das suas combinações. A matéria prima e a espessura podem ser considerados parâmetros de corte, por fazerem parte dos programas de execução da máquina, por outro lado, estes são alterados fora da máquina.

2.4.1 Parâmetros de corte

Segundo Dubey e Yadava (2008), o desempenho do feixe de laser depende maioritariamente da seleção adequada dos níveis para os parâmetros do processo. Abordamos agora de forma sucinta, os seguintes parâmetros de corte: velocidade, potência, espessura, gás e pressão de gás de assistência, relacionando estes fatores e suas combinações com os seus efeitos.

Velocidade, Espessura e potência

O aumento da espessura indica tipicamente uma maior fenda de corte, e vice versa, visto que, segundo Yilbas (1995), o índice de transferência de calor para o metal, diminui com as maiores espessuras e o índice de reações químicas, aumenta com a maior potência, sabendo que, o corte de elevadas espessuras requer potências superiores.

O corte rápido com reduzida potência diminui a fenda de corte e a zona de afetação térmica (Rajaram *et al.*, 2003; Eltawahni *et al.*, 2012). O inverso foi verificado por Chen (1999) e Ozaki *et al.* (2012) em aço de baixo carbono, ou seja, corte lento com elevada

potência aumenta a fenda de corte neste tipo de aço, que é dúctil e próprio para maquinagem. Tipicamente também a rebarba desaparece com o aumento da velocidade.

Segundo Eltawahni *et al.* (2012) a fenda de corte e a ZAT, tipicamente diminuem com aumento da velocidade. Considerando espessuras superiores, é necessária mais energia para assegurar o corte, o que condiciona a velocidade a certos limites. A velocidade e a espessura variam numa relação de proporcionalidade inversa, para manter a melhor qualidade.

Tipo de gás de assistência: O₂ e N₂

Segundo Yilbas (2004) a aplicação do gás inerte, o nitrogénio, permite uma proteção da superfície de corte de reações de oxidação de altas temperaturas. Por outro lado, estas mesmas reações ocorrem quando se usa o oxigénio como gás de assistência, permitindo o corte de espessuras superiores. Tipicamente a indústria usa o **oxigénio** em corte de **ferro** e o **nitrogénio** em corte de **aço**. Isto geralmente implica que a mesma tecnologia consegue cortar espessuras superiores em ferro quando comparado com o corte de aço.

Pressão de gás

O seu aumento beneficia a remoção de material da região de corte e tipicamente é superior quando se corta com nitrogénio, para compensar a ausência de oxidação. Em caso de corte a oxigénio, para além da remoção de material, a maior pressão aumenta também as reações de oxidação exotérmicas.

2.4.2 Corte a Nitrogénio

O aço é um dos materiais mais usados pela Marsilinox, e, sabendo que o Nitrogénio é usado no corte de aço, parece pertinente uma breve abordagem ao seu uso no processo de corte a laser.

Segundo Madić (2012) e Chen (1999) a melhor qualidade de superfície de corte é atingida com nitrogénio, como gás assistente, bem como a menor fenda de corte. Este verifica ainda que a qualidade de corte é inversamente proporcional à espessura a cortar, ou seja, em pequenas espessuras o corte tem melhor qualidade. A. Cekic (2014) verificou que a velocidade de corte é o fator mais significativo no aço, seguido da potência e pressão

de gás. O autor defende ainda que devem ser feitos estudos de otimização destes parâmetros para materiais de diferentes ligas. Ainda que dentro da gama dos aços o comportamento do N₂ seja semelhante, o conhecimento de parâmetros ótimos para cada liga, deve permitir aumentar a qualidade do corte.

2.4.3 Corte a oxigénio

O oxigénio é conhecido pelas reações exotérmicas de oxidação que fornecem energia extra ao corte, principalmente no corte de ferro, por este ser facilmente oxidado. Esta oxidação é vantajosa em corte de alta espessura, já que permite substituir parte da potência requerida ao corte de espessura adicional, pela energia libertada nas reações de oxidação (O'Neill e Gabzdyl, 2000). Por outro lado tipicamente as reações de oxidação resultam em fraca qualidade de corte. Segundo Hu *et al.* (2012) o fluxo do feixe de laser é praticamente o mesmo durante o corte, com ou sem oxidação, indicando que o consumo de oxigénio por oxidação é baixo. Por outro lado, a sua influência em tensões e forças de cisalhamento do fluxo é significativa, e a estrutura do fluxo sofre distúrbios, que por vezes podem redirecionar material para zonas de acumulação, causando rebarba.

O oxigénio é um gás de assistência instável quando comparado com gases inertes. As potenciais oxidações tornam este gás de certo modo imprevisível. No entanto as condições ótimas de corte foram investigadas por H. Golnabi e M. Bahar (2009) e os resultados para o corte de aço ferrítico e austenítico são bastante próximos, inclusive a potência é semelhante em ambos os casos para espessuras de 1 a 2 mm. Por outro lado a pressão do gás no aço ferrítico é muito inferior, o que leva a tentar reduzir reações de oxidação, ainda assim a fenda de corte é ligeiramente superior neste caso.

2.4.4 Chapa de alta espessura

Em chapa de alta espessura é difícil cortar o material sem criar rebarba, devido às altas potências necessárias para se efetuar o corte. Yilbas (2004) constata que a redução da potência do laser e aumento da velocidade de corte aumentam a eficiência térmica e reduzem fenda de corte, mas não garantem a conclusão do corte neste tipo de chapa. Por outro lado, o inverso aumenta a velocidade máxima a que é possível efetuar o corte, o que garante o corte (Ozaki, 2012), mas provoca um aumento na ZAT.

O aumento da pressão do gás, tratando-se do oxigénio, faz elevar a taxa de reações de oxidação a alta temperatura, o que facilita o corte, mas contribui para o aumento da ZAT. Tratando-se do nitrogénio, não ocorre oxidação, e mantém-se uma ZAT reduzida, no entanto, implica que o processo precisa de potências superiores. Já a redução da pressão do gás e da velocidade de corte causa formação prematura de rebarba na superfície de corte, principalmente na base do produto final. Yilbas (2004) verifica ainda que, o aumento da velocidade e da potência em conjunto, reduzem o aparecimento de estrias (Fig. 8), melhorando a qualidade de corte, mas perdendo em eficiência térmica. Segundo Karatas (2006) o tamanho das estrias aumenta também com o aumento da espessura.



Fig. 8 - Estrias em superfície de corte

(Adaptado de: Yilbas *et al*, 2010)

2.4.5 Corte inclinado

O corte inclinado (Fig. 9 (a)) é tratado por Yilbas *et al.* (2008), o qual compara com o corte tradicional usando aço macio. Este apresenta o corte inclinado como alternativa ao corte tradicional, que pode ser proveitoso em algumas situações, mas que apresenta maior sensibilidade a deformações, sendo que, este é particularmente afetado pela potência. O autor explica que com reduzida potência, algum material derretido é desviado para a face superior da peça, bem como a movimentação de escória na face inferior causa erosão térmica (Fig. 10). Esta erosão térmica poderá ser também observada no corte de chapa deformada, dependendo do ângulo de corte e da potência, situação que, prejudica a qualidade do corte.

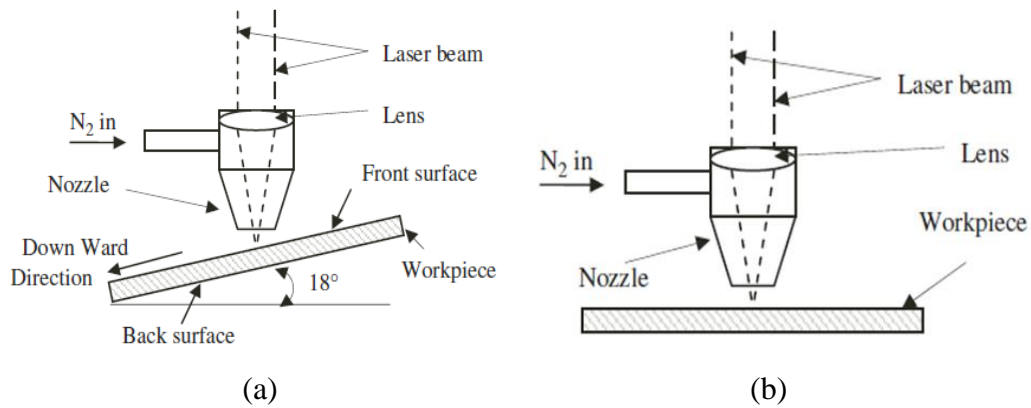


Fig. 9 - (a) Corte inclinado, (b) Corte tradicional

(Retirado de: Yilbas *et al.* (2008))

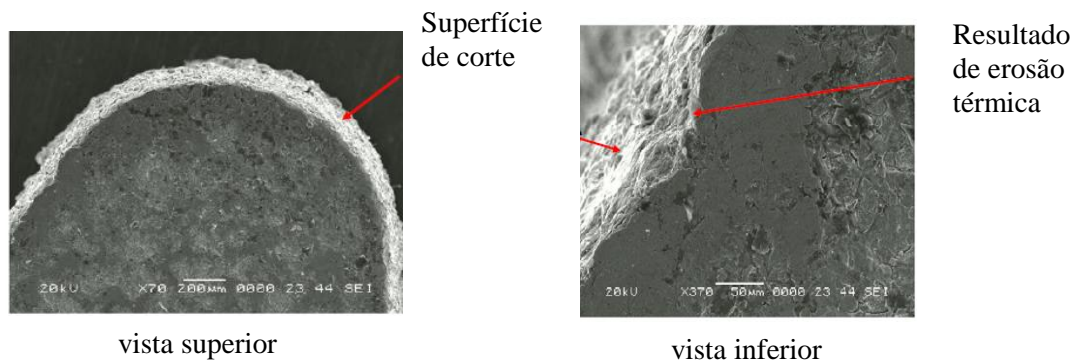


Fig. 10 - Erosão térmica em superfície de corte

(Adaptado de: Yilbas *et al.* (2010))

2.4.6 Lente de foco

A lente de foco do laser é responsável pelo foco da radiação que provoca a fenda de corte. Caso esta não esteja devidamente limpa, depósitos de pó e outras partículas podem alterar o fluxo da radiação, e consequentemente, o foco. O desalinhamento do sistema de focagem do laser também é altamente prejudicial à qualidade de corte no que diz respeito à fenda de corte e rugosidade da superfície (www.troteclaser.com). Para combater este aspeto podem ser produzidas óticas mais rígidas ou criados sistemas adaptativos de alinhamento de feixes de laser (Chen, 1996).

Segundo Xie (2001) existem ainda possíveis perdas por difração que aumentam com a distância focal. Estas perdas são reduzidas com a diminuição do diâmetro do feixe até certo ponto.

As lentes do laser têm uma absorção média de radiação, que é inferior numa lente nova e limpa, em relação às que são usadas diariamente (News update, 1996). Para o processo de corte é benéfico a menor absorção possível. Esta absorção deve-se ao banho anti refletor de ambas as faces da lente, mas com o passar do tempo a acumulação dos já mencionados pós, aumenta esta absorção contribuindo para o aquecimento da lente. O aquecimento provoca dilatação na lente alterando a sua arquitetura e consequentemente o seu índice de refração. Tipicamente a curvatura da lente aumenta, elevando o índice de refração e encurtando a distância focal. Uma quantidade significativa de partículas de sujidade na lente cria pontos quentes junto das mesmas. Desta forma o aquecimento não é homogêneo, piorando o diâmetro de foco e aumentando a fenda produzida, ou seja, aumentando o desvio da especificação. No que diz respeito à perfuração a laser, o foco é muito significativo na geometria do furo (Yilbas, 1997).

3 Caso de estudo

3.1 Processo Produtivo

Seguidamente descrevem-se os processos produtivos da empresa e, em particular, o processo de corte a laser.

3.1.1 Processo produtivo da Marsilinox

A Marsilinox produz qualquer produto metálico, passível de ser efetuado pelos seus serviços de corte, puncionagem, quinagem e soldadura. Como já foi referido na introdução deste relatório, a produção na Marsilinox passa, numa primeira fase, por processos de corte. No caso de estruturas procede-se a corte de varão, de tubo, ou de outras estruturas, em serrote mecânico. Quando é necessário corte de chapa para produto inacabado ou para produto final escolhe-se o corte a laser, em casos de maior detalhe e precisão como por exemplo para furos ou corte de letreiros. Para corte menos complexo, mas mais barato, é possível usar puncionagem e para corte simples e linear de chapa usa-se a guilhotina. A etapa seguinte é de acabamento de chapa, nomeadamente esmerilagem. Quer exista quer não exista especificação para o processo anterior, a etapa seguinte é de dobragem de chapa. Caso existam esquinas efetua-se quinagem, caso estas não existam efetua-se calandragem. Em seguida, independentemente do processo anterior, e caso seja especificado no desenho, efetua-se o acabamento de furos, se tiverem roscas executa-se roscagem, caso contrário pretende-se desbaste de material por escareagem. Por fim, efetuam-se as soldaduras e as montagens de produto não acabado, proveniente dos processos anteriores. Caso não haja especificação para soldadura ou montagens, segue-se diretamente para o controlo de qualidade, embalagem e expedição. Caso esta especificação exista, efetuam-se esses processos apenas depois da soldadura e montagem.

Na Fig. 11 é ilustrado o fluxograma elaborado para representar o processo produtivo da Marsilinox. Cada decisão é efetuada com base na observação do respetivo desenho.

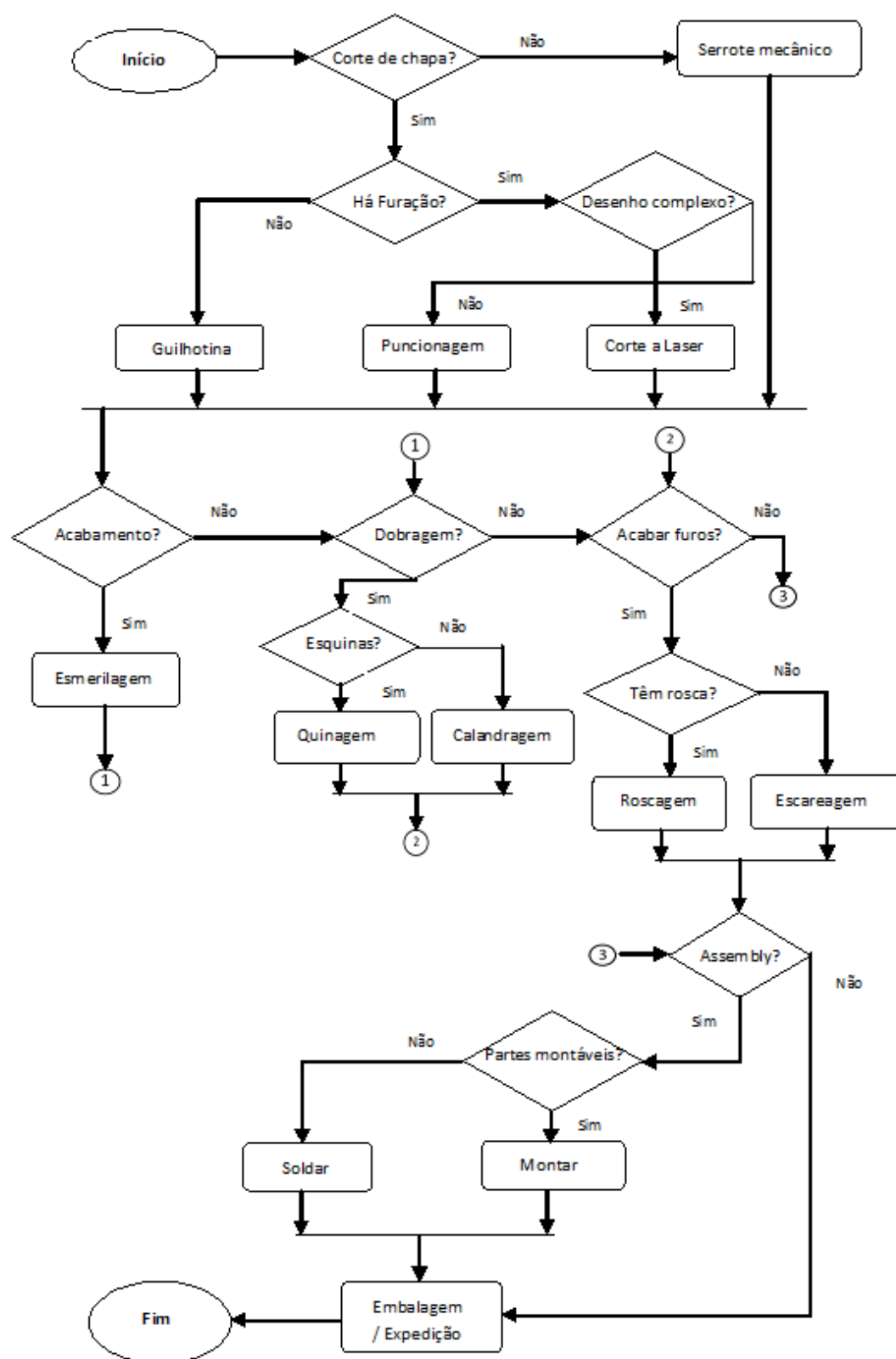


Fig. 11 - Fluxograma do processo produtivo da Marsilinox

3.1.2 Processo produtivo de corte a laser

Nesta secção aborda-se o processo de corte a laser, primeiramente com uma breve descrição do trabalho dos recursos humanos, desde a programação até à gestão de chapa e de seguida detalhando o processo de fabrico em cada etapa.

Programador, gestor de chapa e operador de laser comunicam e fazem a gestão de corte através de uma base de dados e de um servidor. O programador efetua a programação CNC, produzindo um ficheiro por cada chapa a cortar. A programação é organizada por espessura de chapa e de forma a minimizar desperdícios, pelo que é frequente serem cortadas na mesma chapa peças de encomendas diferentes.

É feito um planeamento de corte no departamento técnico, tendo em conta o *stock* existente, as prioridades por cliente e as ordens de serviço em espera. Este planeamento é por sua vez enviado para o gestor de chapa e para o operador do laser. Deste modo o gestor de chapa consegue organizar uma sequência de corte, identificando o material em *stock*. O operador procura a programação feita que é colocada no servidor, e, de acordo com o material a ser cortado, aplica a programação à máquina e efetua as trocas de chapa necessárias.

Qualquer chapa não cortada na totalidade é inserida na base como retalho e guardada para completar outras encomendas. Toda a chapa cortada na totalidade é separada em contentores de alumínio, aço austenítico, aço ferrítico e ferro, para sucata. O processo produtivo propriamente dito consiste em 5 etapas.

Na Fig. 12 representa-se esquematicamente o processo produtivo de corte laser. No fluxograma existe apenas uma decisão que diz respeito à existência de rebarba e deve levar à sua remoção caso exista.

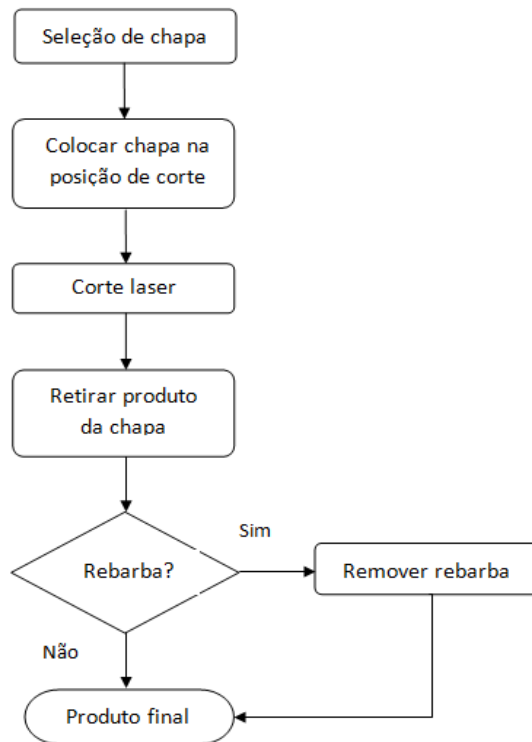


Fig. 12 - Fluxograma do Processo Produtivo de corte a laser

1. Em primeiro lugar é selecionada a chapa. A organização do gestor de chapa tem por base a natureza do material e a espessura da chapa. No entanto, por vezes, tem de considerar o cliente, acabamento e estado da chapa. O acabamento pode ser esmerilado, espelhado ou "2B" (chapa lisa). O estado da chapa é referente a riscos entre outras mal formações e se é chapa nova ou reutilizada.
2. De seguida é inserida a chapa na posição de corte (Fig. 13), na mesa de corte, com o apoio de uma máquina de vácuo ou de uma ponte rolante.

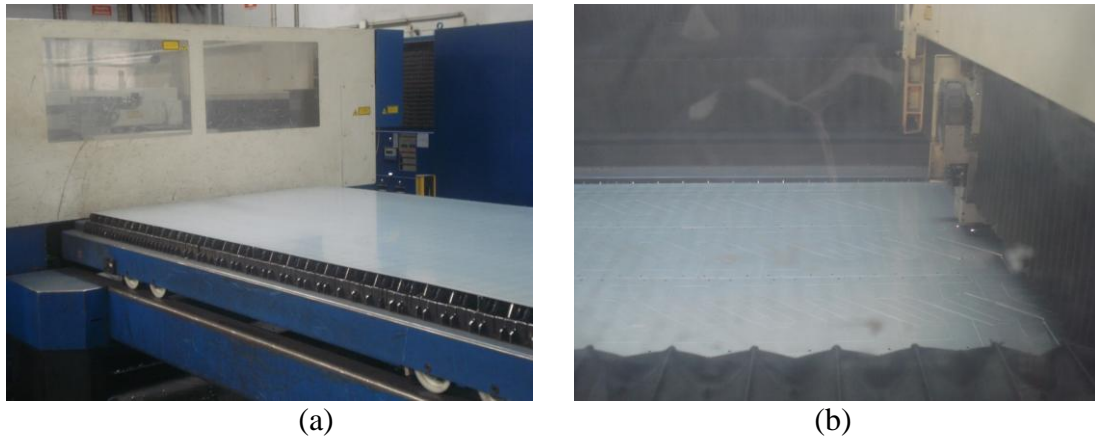


Fig. 13 - (a) Chapa nova na posição de corte; (b) Corte a laser em execução

3. Existem duas mesas de corte. Para que se retire a chapa anteriormente cortada do interior da máquina, a mesa que contém esta chapa, desloca-se para fora, enquanto, ao mesmo tempo, uma segunda mesa, onde se encontra a próxima chapa a cortar, é deslocada para o interior da máquina. Durante esta troca, caso alguém ultrapasse as barreiras de segurança, o processo é interrompido. Prontas as mesas, o operador executa o próximo programa, dando início ao corte a laser.
4. Acabado o corte, as peças encontram-se ainda na chapa, seguras por uma *microjoint*. Esta *microjoint* é criada propositadamente para segurar o produto à chapa. O laser inicia a perfuração num ponto, fora do limite do futuro produto, e acaba o corte na proximidade deste ponto inicial. Disto resulta uma saliência de material em excesso, que segura a peça à chapa, para que as peças sejam apenas removidas após a totalidade do corte e não sejam perdidas durante a movimentação da chapa. Segue-se então a remoção das peças da chapa. Após a remoção do produto da chapa, a *microjoint* deve ser removida do produto final.
5. Existindo rebarba depois do corte, como mostra a Fig. 14 (a), esta deve ser removida das peças para que depois possa ser conferido e embalado o produto final.



(a)

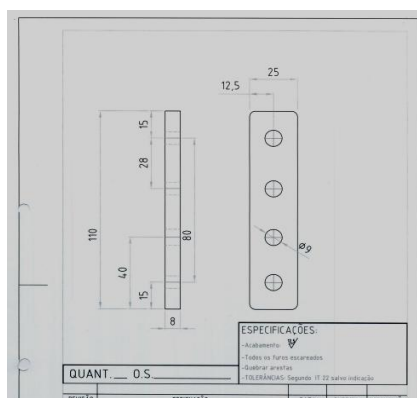


(b)

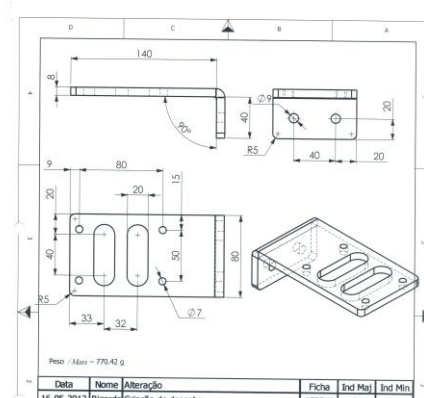
Fig. 14 - (a) Peças com rebarba, (b) Peças depois de removida a rebarba

O produto

As peças analisadas neste trabalho têm geralmente desenho geométrico retangular, com algumas variações, que geram medidas para além de comprimento e largura. Na Fig. 15 são representados dois desenhos técnicos de peças produzidas em corte laser na Marsilinox.



(a)



(b)

Fig. 15 - Desenho técnico típico de peça para produção em corte laser. Produto final (a) e produto inacabado no fim deste processo (b).

(Fornecido por: Marsilinox Lda.)

Na Fig. 15 (a) é possível observar o desenho técnico de um produto, que quando sai do corte a laser, é produto final, já o produto observado em (b), é produto inacabado quando sai do corte a laser, sendo o próximo processo de quinagem.

3.2 Descrição das possíveis causas de deficiente qualidade do produto de corte a laser

Nesta secção são analisados os fatores que causam deficiente qualidade do produto de corte a laser. Com a ajuda do departamento técnico e de qualidade foram definidos 6 principais fatores causadores deste problema. A Fig. 16 mostra o diagrama de Ishikawa elaborado para esses 6 principais fatores, explicados em seguida.

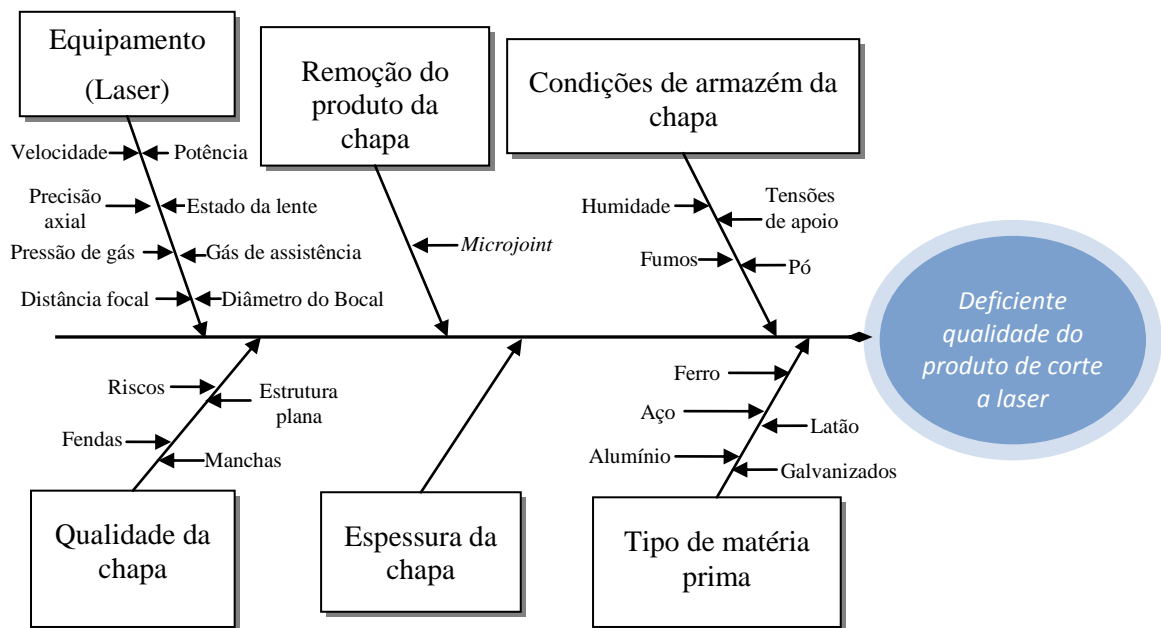


Fig. 16 - Diagrama de Ishikawa para a deficiente qualidade do produto de corte a laser

Descrevem-se agora detalhadamente os aspetos que tornam as causas relevantes para o problema e como estas se enquadram com a situação da empresa.

Remoção do produto da chapa

A existência da *microjoint*, não influencia a qualidade do corte da máquina, mas sim a qualidade do produto final do corte a laser, dado que, é efetuada a quebra desta *microjoint* para remoção do produto da chapa, o que deixa irregularidades, no mesmo, que devem ser removidas.

Qualidade da chapa

Este tópico diz respeito às condições físicas da chapa, nomeadamente existência de riscos, fendas, manchas e se a chapa é plana ou empenada. Ainda que muita matéria prima seja adquirida com proteção de PVC, para prevenção de riscos, alguns destes são provocados internamente por falta de cuidado na troca de chapa no laser ou mesmo no armazém. Por outro lado e ainda que seja raro, por vezes a chapa vem com defeitos do próprio fornecedor.

Equipamento

Neste caso o equipamento é o responsável direto pela produção e como se observa no diagrama da Fig. 16, este é o fator primário que contém mais fatores de segundo nível. A empresa possui um laser de CO₂, a duas dimensões, limitado a corte e perfuração (Fig. 17). Este está dependente das suas capacidades e parâmetros de corte. A precisão axial define a qualidade do laser no cumprimento das especificações do desenho. A qualidade do corte é diretamente afetada por parâmetros como a potência de corte, distância focal da lente, pressão e tipo de gás de assistência, diâmetro do bocal e velocidade de corte.



Fig. 17 - Laser de CO₂ TRUMFP TruLaser 3030

Este laser corta ferro com oxigénio e aço com nitrogénio. A nível de espessuras, corta aço até 15mm e ferro até 20mm. Como já foi referido, a oxidação do ferro pelo oxigénio é uma reação exotérmica que proporciona energia extra ao processo, permitindo

tipicamente que, com o oxigénio, se cortem espessuras superiores, quando comparado com o corte a nitrogénio.

Para além dos gases de assistência, a máquina consome hélio e dióxido de carbono no seu ressoador ótico, e energia elétrica, para os movimentos mecânicos e emissores de radiação.

Podem ser usados 3 tamanhos de lente de foco (Fig. 18), respetivamente para 3 distâncias focais distintas.



Fig. 18 - Lentes de foco

Para cada lente é possível atingir a menor fenda de corte quando o foco definido é igual à distância focal, especialmente em chapa fina (Karatas *et al.*, 2006). Sabe-se ainda que, a fenda diminui com o aumento da distância focal (Eltawahni *et al.*, 2012), pois quanto maior for a distância da lente ao foco, mais estreito será o fluxo de radiação no foco, provocando também uma fenda de corte mais estreita, e consequentemente, menor desvio em relação à especificação. O estado da lente, no que diz respeito a sua limpeza, é também importante para manter o seu desempenho. Este tópico é abordado na secção 3.3.

Os fatores analisados neste trabalho são descritos seguidamente e são denominados, respetivamente, de Armazém, Matéria prima e Espessura no capítulo seguinte.

Condições do Armazém de chapa

Um armazém está muitas vezes sujeito a condições ambientais não controláveis como humidade, temperatura e pó. Existem ainda condições controláveis como fumos, resíduos ferríticos derivados de outros processos de fabrico, ou ainda, como as tensões de apoio da chapa no armazém. Na Fig. 19 ilustram-se as situações de *Stock* de chapa na vertical e na horizontal.



(a)



(b)

Fig. 19 - (a) *Stock* de chapa na vertical

(b) *Stock* de chapa na horizontal

Tipo de matéria prima

O tipo de matéria prima está relacionada com a natureza do material e a sua composição elementar, ou seja, a sua liga. Da matéria prima utilizada pela empresa fazem parte diversas ligas de aços austeníticos e ferríticos, identificados quanto à liga, segundo o sistema de classificação da "American Iron and Steel Institute" (AISI). A empresa utiliza ainda ferro, alumínio, latão, aço mola, hardox e galvanizados.

Neste relatório abordam-se principalmente as matérias primas ferro e aço, dado serem as mais utilizadas na Marsilinox. Seguidamente descrevem-se, resumidamente, os tipos destas matérias primas utilizadas na empresa.

Aço

Os aços mais usados na empresa são aços de baixo carbono, ou seja, são aços dúcteis e próprios para maquinagem, designados de "Mild Steel", na literatura, ou aços macios.

São alguns deles o AISI 430, como aço ferrítico, e, os aços austeníticos AISI 304 e AISI 309. Como aços austeníticos, o AISI 309 distingue-se do AISI 304 pela sua superior resistência a altas temperaturas. A Marsilinox aplica este aço em fornos para a indústria da panificação. Já o AISI 430, como aço ferrítico, é destinado a produtos mais baratos.

Ferro

Relativamente ao ferro, quando é encomendado para produção de estruturas, é por vezes requisitado galvanizado ou pintado, para proteção contra a oxidação, ao contrário de casos em que é usado na produção de pequenas peças, dependendo da finalidade do produto.

Espessura da chapa

A espessura da chapa corresponde à espessura do produto final de corte. Os resultados de trabalhos de autores como Hu *et al.* (2012) e, Yilbas e Sahin (1995), apontam para que, quanto maior é a espessura da chapa maior é a probabilidade de existir rebarba no produto final.

Segundo Yilbas e Sahin (1995), o índice de transferência de calor para o metal que deve ser removido decresce à medida que a espessura aumenta, provocando um aumento de reações exotérmicas, que resulta em escória. A elevada espessura também aumenta a rugosidade na superfície de corte (Radovanovic e Dasic, 2006) e, como necessita de potências superiores, geralmente leva a corte lento e ineficiente energeticamente.

3.3. Manutenção do Laser e Limpeza da Lente

Na Marsilinox é efetuada uma manutenção diária, ao fim do dia, destinada à limpeza do equipamento que está em contacto com a chapa durante o corte a laser. Esta consiste na limpeza do tapete rolante que conduz desperdícios de corte e todo o tipo de sucata residual que cai da mesa de corte. Fazem também parte desta manutenção a substituição dos suportes de apoio da mesa de corte, quando necessário, pois são levemente danificados pelo plasma resultante do corte e com o passar do tempo ficam danificados, ao ponto de a mesa deixar de ser plana. O despejo dos recipientes de sucata nos devidos contentores é a fase final dessa manutenção.

Para manter o bom nível do equipamento ótico do laser, a Marsilinox efetua internamente limpeza/substituição da lente de foco, processo descrito seguidamente.

Limpeza da lente de foco

A limpeza da lente pode ser feita numa primeira fase com o equipamento de ar comprimido para libertar partículas e numa segunda fase com líquido e tecido, próprios para limpeza da lente (www.troteclaser.com). Este tecido geralmente é 100% de algodão. Na Fig. 20 representam-se as 2 formas de aplicar o líquido de limpeza, na lente em (a) ou no tecido em (b) e último passo de limpeza da lente em (c).

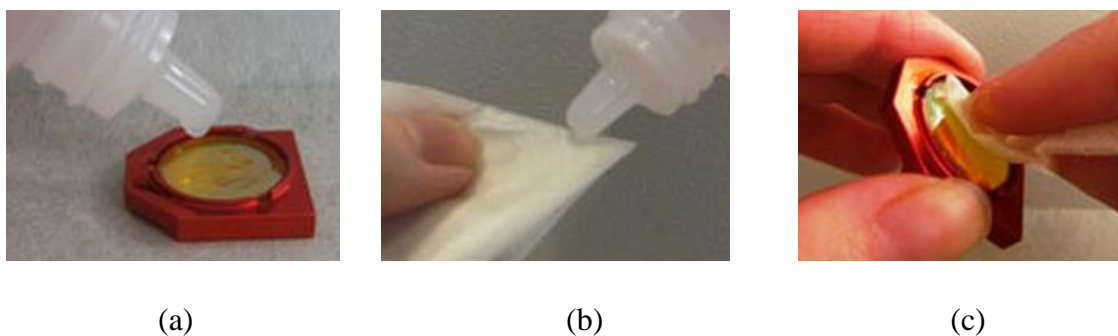


Fig. 20 - Aplicação do líquido na lente(a) e no tecido (b), (c) limpeza da lente
(retirado de: www.troteclaser.com)

Segundo os técnicos da Marsilinox, uma lente com partículas de pó pode causar corte com rebarba e aumento da fenda de corte. Estas manifestações verificam-se mais facilmente em peças de espessura considerável. Se a distância focal usada for inferior à distância focal produzida pela lente (situação de foco adiantado), a radiação foca num ponto antes do centro da espessura da peça e começa a difundir a radiação muito antes de sair da peça, provocando acumulações de escória na face inferior da peça. Se a distância focal é superior à distância focal da lente (situação de foco atrasado), a fenda de corte aumenta na face superior, já que o foco é feito depois do centro da peça em termos de espessura.

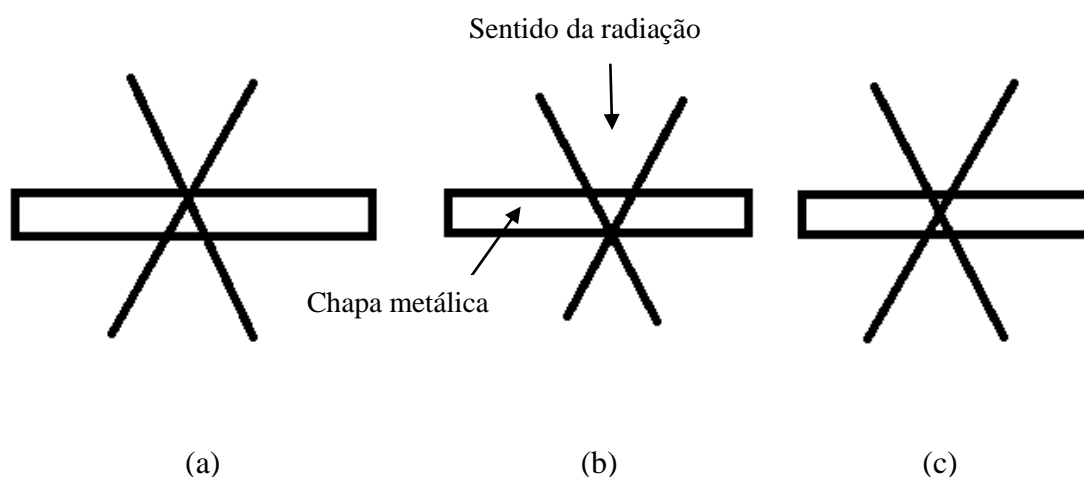


Fig. 21 - (a) foco adiantado, (b) foco atrasado, (c) foco centrado

A Fig. 21 representa um esboço das possíveis posições de foco referidas anteriormente, relativamente à espessura da chapa. A posição (c) cria a menor fenda de corte por corresponder à distância focal da lente e melhor qualidade de corte, por minimizar acumulações de material na superfície de corte (Karatas *et al.*, 2006).

Para controlar o foco são efetuados "testes de ponto" (denominação interna), durante a já referida manutenção diária, para verificar a precisão e localização do ponto focal do feixe de laser. A lente é assim limpa ou substituída, quando se verificam anomalias nestes testes.

4 Resultados e Discussão

4.1 Análise preliminar dos dados

O controlo de qualidade é relevante nas peças mais complexas, principalmente nas que passam por soldadura, por este ser o processo que acrescenta mais valor ao produto. No entanto, verifica-se que a variabilidade das peças saídas dos processos mais complexos é elevada.

Por outro lado, a pequena produção em massa proveniente do corte a laser, não apresentava, no início do projeto, não conformidades em relação à tolerância da Marsilinox, até surgir uma encomenda com tolerância do cliente. No decorrer do controlo de qualidade desta encomenda foram identificadas não conformidades e o foco do trabalho passou a ser a produção em massa de corte a laser. Este caso particular é tratado na secção 4.2 como um caso pontual de um lote não conforme.

O registo e análise dos dados necessários para este trabalho, foi possível graças a criação de um formulário de recolha de dados.

Elaboração do formulário de recolha de dados

Numa primeira fase, este era destinado ao registo de 4 medidas por lote, passando depois a destinar-se apenas às duas medidas mais pequenas, denominadas de largura e medida 1, mas também ao registo das categorias dos fatores de corte. A escolha das medidas mais pequenas como alvo de análise deve-se ao facto de ser nestas medidas que se identificam maior número de não conformidades, para tolerâncias de clientes e da própria Marsilinox.

O formulário foi elaborado para existir um preenchimento por cada lote de produção, sendo que cada linha corresponde a uma observação, onde se registam as medidas das peças. Representa-se na Fig. 22 o cabeçalho do formulário.

Registo de observações de lotes de produção de corte a laser									
Armazém									
Matéria P									
Espessura		Amostra		Data		Lote			
Operador		Limpeza lente		Período					
Bocal		Fenda corte		amostra		especificação			
Peça	Qt	Qt amostra	N amostra	largura	medida 1	largura	medida 1	Tolerância	Cliente

Fig. 22 - Formulário de recolha de dados para corte a laser

Na parte superior do formulário registam-se as informações relativas à data da recolha e período do dia (manha/tarde), que geralmente coincidem com os da produção, exceto nos casos em que esta é feita em regime noturno. Ainda nesta parte, insere-se o número do lote (criado apenas para o projeto) e as categorias dos parâmetros da máquina e restantes fatores usados no corte deste lote, nomeadamente o armazém de onde vem a chapa, tipo de matéria prima, espessura da chapa, operador de serviço, fenda de corte teórica. Registava-se ainda o tempo, em semanas, desde a última limpeza de lente e o modo como era feita a recolha amostral - (i) aleatória simples, quando as peças eram retiradas ao acaso, ou (ii) sistemática, quando, por exemplo, era retirada uma peça após a produção de cada 20. Na parte inferior do formulário registam-se as informações relativas à peça em causa e especificações do cliente. Da esquerda para a direita registava-se o nome da peça produzida no lote, a quantidade encomendada e a quantidade recolhida para a amostra. As seguintes três colunas originam um número de linhas igual ao número de observações registadas, onde se insere o número ("N amostra"), a "largura" e a "medida 1" de cada observação. Continuando à direita regista-se a largura e medida 1, especificada pelo cliente, bem como a tolerância a seguir, ou seja, em primeiro lugar segue-se a tolerância específica da medida, em segundo lugar a tolerância do cliente e em terceiro lugar, caso não existam as anteriores, segue-se a tolerância de 5% da Marsilinox. Por último regista-se o nome do cliente.

Numa segunda fase registavam-se as informações da parte inferior do formulário numa folha de Excel, com cálculo automático das tolerâncias máximas e mínimas, para elaboração de gráficos de tendência, com o objetivo de identificar os pontos não conformes.

Os dados relativos à parte superior do formulário, ou seja, aos fatores e respetivas categorias de cada lote, eram encaminhados para uma tabela. A Fig. 23 mostra o cabeçalho dessa tabela onde é visível um "registo" (do número de lotes usados no trabalho), o "lote", referente ao número do lote, cuja contagem se iniciou desde a primeira recolha amostral, e, os fatores, ou seja, o operador, a matéria prima, o armazém, a espessura, a fenda e o bocal com registo auxiliar das limpezas e data de cada registo. Os níveis começam a ser registados a partir da 1ª limpeza da lente, para que, lotes anteriores à mesma não influenciem os efeitos no desvio de corte, que por sua vez iria influenciar análise, dos dados recolhidos relativamente aos fatores considerados. O fator velocidade não é inserido nesta tabela por ser mantido constante. O fator potência também não é abordado, devido ao facto de nos programas efetuados para corte a laser, variar consoante a espessura, tal como o tipo de gás assistente varia com o tipo de matéria prima.

Níveis por Lote								
Registo	Lote	Operador	MP	Armazém	Espessura	Fenda	Bocal	Data

Fig. 23 - Tabela de registo dos níveis

Além dos fatores anteriores não serem abordados, também a fenda de corte programada, o bocal e o operador são excluídos. Os primeiros dois não apresentam variabilidade suficiente para se quer criarem todos os grupos de dados, e o operador, apenas influencia a recolha do produto da chapa e a remoção de rebarbas e vestígios de *microjoints*. Assim, não influenciando diretamente o corte, este é também excluído.

Os fatores analisados neste trabalho podem ser observados na Tabela 1, bem como os respetivos níveis considerados.

Tabela 1 - Fatores a analisar e respetivos níveis

Fatores	Matéria Prima		Armazém		Espessura	
Níveis	Ferro	1	Chapa na vertical	1	< 2mm	1
	Aço	2	Chapa na horizontal	2	>=2 e <5mm	2
					>= 5 mm	3

Seguem-se os registos da inspeção dos lotes considerados e respetiva análise de dados.

4.1.1 Análise dos Desvios

No total são consideradas 587 unidades recolhidas para amostra, provenientes de 24 lotes. Cada lote é representativo de um produto final diferente, proveniente do processo produtivo de corte a laser. Os produtos selecionados têm forma aproximadamente retangular, são de pequenas dimensões e de espessuras não superiores a 12 milímetros. Todas as observações são registadas em milímetros, e recolhidas aleatoriamente ou sistematicamente (uma pequena parte), como já foi referido, sendo a amostra considerada aleatória. Os desvios de cada lote são verificados para a medida mais pequena registada, entre "largura" e "medida 1" e são calculados da seguinte maneira:

Desvio = valor da especificação - valor medido em cada observação

A Fig. 24 representa o histograma referente aos desvios registados.

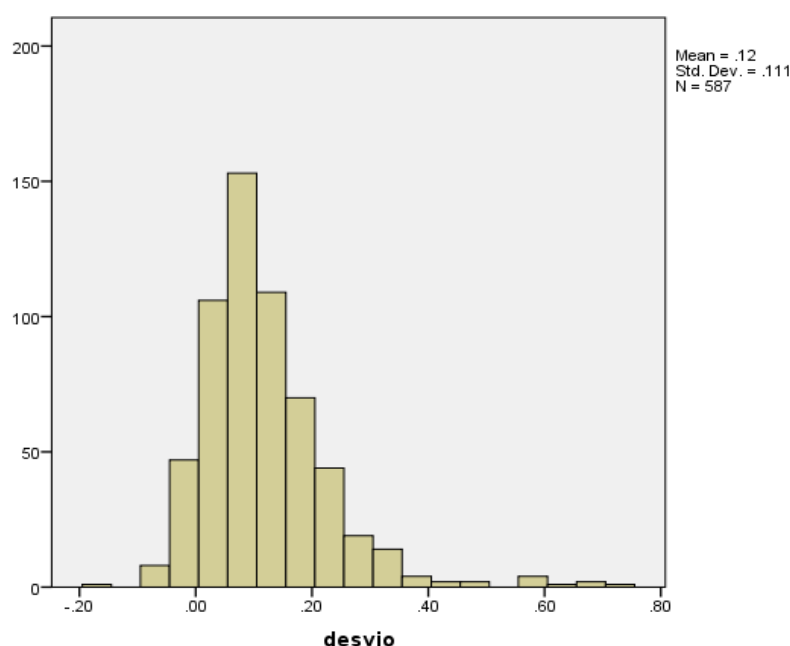


Fig. 24 - Histograma dos desvios de todas as amostras

Pode-se observar que o intervalo de variação do desvio é maioritariamente positivo. Ora o desvio foi calculado através da subtração de especificação pelo valor da amostra. Podemos então concluir que a especificação é, na maior parte dos casos, superior ao valor produzido. Isto pode ter como causa a não consideração do valor de fenda de corte na programação, já que até à segunda limpeza da lente os valores de fenda de corte registados são todos iguais a 0,2mm e os valores dos desvios oscilam na sua maioria entre 0 e 0,2mm.

Em seguida, procedeu-se a uma análise entre as variáveis desvio e especificação. Na Fig. 25, representa-se um gráfico de dispersão, da relação entre essas variáveis.

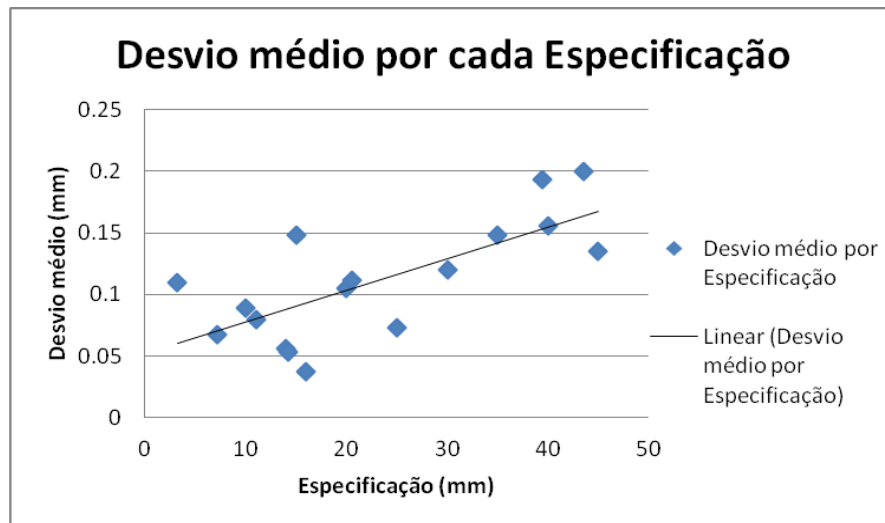


Fig. 25 - Gráfico de dispersão do desvio médio em função da especificação

O uso de todas as observações neste gráfico seria representado na forma de colunas de pontos, representativos de todos os desvios para cada especificação. Em sua vez, são usados os desvios médios das observações para cada especificação e relacionados com a respetiva especificação. Verifica-se que há bastante dispersão entre os pontos, embora estes sigam um padrão linear, que pode ser modelado por uma linha de declive positivo.

Procedeu-se, ainda, a um teste à correlação entre as variáveis especificação e desvio, no sentido de averiguar se estas se encontram relacionadas (Tabela 2).

Há correlação entre duas variáveis quando existe uma relação da variação de uma em função da outra. É usado o coeficiente de correlação de "Pearson". Este varia entre "-1" e "1" e define o tipo de correlação de acordo com os valores que toma. Se estiver compreendido entre "-1" (inclusive) e "0", existe uma correlação negativa, que é mais negativa quanto mais próximo de "-1" o coeficiente estiver, por outro lado se estiver compreendido entre "0" e "1" (inclusive) a correlação é positiva, sendo mais positiva quanto mais próximo de "1" estiver o coeficiente. Caso o indicador seja igual a "0" não há correlação entre as variáveis (Pearson, 1895).

Tabela 2 - Correlação entre especificação e desvio

		Especificação
Desvio	"Pearson Correlation"	0.246
	Sig. (2-tailed)	0
	N	587

Pode verificar-se, através da informação contida na Tabela 2, que a correlação entre o desvio e a especificação é significativamente diferente de zero, sendo no entanto, o coeficiente de correlação de "Pearson" positivo, mas relativamente baixo, indicando que existe uma pequena relação entre as duas variáveis.

4.1.2 Estatísticas dos fatores de corte

No total são consideradas 557 unidades recolhidas para amostra, provenientes de 23 lotes. A primeira amostra de 30 unidades, foi recolhida apenas para controlo dos desvios sem registo dos fatores e por isso foi apenas considerada no histograma dos desvios (Fig. 24).

Os parâmetros Fenda de corte e Bocal, foram excluídos devido à ausência de grupos de dados com todos os níveis. Os fatores em análise são: Espessura, Matéria Prima e Armazém. O caso do operador é exceção. Não há estudos que provem que a mão de obra seja significativa no processo de corte a laser, ou que tenha mesmo qualquer influência no processo. Sendo as suas interações com o processo apenas de remoção das peças da chapa e remoção de rebarba depois do processo, não há influência direta no corte. Já a colocação da chapa na posição de corte é efetuada antes, mas apenas influencia a quantidade de chapa para retalho ou de peças defeituosas, caso o posicionamento falhe e seja efetuado corte fora da chapa, já que os programas simulam a chapa cortada tendo em conta uma posição de corte correta. Assim excluiu-se também o operador e procedeu-se à análise dos desvios para os fatores restantes.

Em seguida apresentam-se as estatísticas descritivas para cada fator e seus níveis.

Armazém

Relativamente ao fator armazém, para o qual se consideram os níveis “Na vertical” quando a chapa é armazenada na vertical e “Na horizontal”, quando a chapa é armazenada na horizontal, pode verificar-se que, quer a média, quer o desvio padrão dos desvios é inferior em relação ao caso de armazém na vertical, o que indica que há melhor qualidade de corte quando é usada chapa do armazém na horizontal.

Tabela 3 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Armazém

Armazém		Observações		Variável Dependente (Desvio)	
		Frequência absoluta	Frequência relativa (%)	Média	Desvio Padrão
Válido	Na vertical	282	50.6	0.116	0.0675
	Na horizontal	245	44	0.102	0.0442
	Total	527	94.6		
Em falta		30	5.4		
Total		557	100		

Verifica-se ainda que são efetuadas mais observações de chapa cortada na vertical e que há trinta observações em falta.

Na Fig. 26, verifica-se que se obtêm melhores resultados quando a chapa é armazenada na horizontal. Embora as médias dos desvios de corte sejam próximas em ambos as categorias de armazém, para chapa na vertical verifica-se um maior intervalo no diagrama tipo caixa. Há. Assim, uma indicação de que a armazenagem na vertical resulta geralmente numa maior variabilidade do desvio de corte.

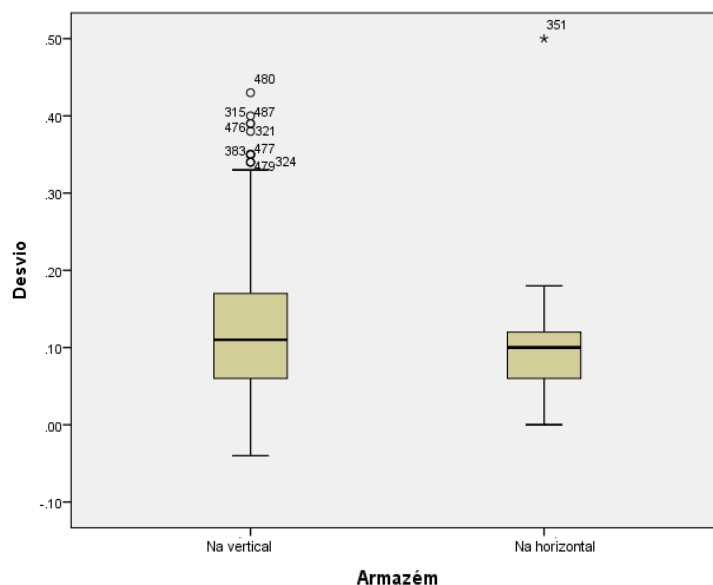


Fig. 26 - Diagrama tipo caixa do desvio de cote em função das categorias de Armazém

Uma vez que a chapa na horizontal sofre tensões uniformemente na sua superfície de contacto e muitas vezes contém proteção de PVC, é mais fácil a conservação da sua qualidade. Já a chapa exposta na vertical geralmente não tem proteção de PVC estando constantemente exposta às partículas e poeiras resultantes de outros processos. Pesa também o facto de que estas chapas se apoiam geralmente numa aresta que se comporta como base e sofrem apoio em dois pontos de tensão, que por ação da gravidade e com tempo causam alguma deformação. Como é referido na secção 2.4.7, o corte em chapa deformada pode ter comportamento semelhante ao corte inclinado em certos pontos da chapa. Deste modo é possível haver movimentações de material derretido em ambas as faces da peça durante o corte. Estas movimentações podem causar erosão térmica diminuindo a qualidade do corte. Deixa-se assim a recomendação de alteração ou complementação da estrutura onde se armazena a chapa na vertical e da possibilidade de aplicação de proteção de PVC à chapa destinada a este tipo de armazém.

Espessura

Na tabela 4 representam-se as observações para a espessura e suas categorias. São definidos três níveis para este fator, inferior a dois milímetros, igual ou superior a dois milímetros e inferior a cinco milímetros, e maior ou igual a cinco milímetros.

Tabela 4 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Espessura

Espessura		Observações		Variável Dependente (Desvio)	
		Frequência absoluta	Frequência relativa (%)	Média	Desvio Padrão
Válido	< 2mm	205	36.8	0.103	0.0831
	>= 2mm e < 5mm	250	44.9	0.0749	0.0618
	>=5mm	102	18.3	0.2105	0.1005
	Total	557	100		

Verifica-se que a espessura mais observada foi a intermédia, igual ou superior a dois milímetros e inferior a cinco milímetros. Já amostras de espessuras superiores a cinco milímetros representam apenas 18,3%, como mostra a Tabela 3. Esta falta na chapa de maiores espessuras vai também dificultar a criação de grupos de dados com todas as combinações para análise de variância.

Verifica-se ainda na Tabela 4 que, o corte das maiores espessuras resulta em média e desvio padrão de desvios de corte superiores. Segue-se a chapa de menor espessura com valores intermédios e por fim a chapa de espessura intermédia, que mostra os melhores resultados entre as três categorias.

Em seguida, na Fig. 27, é representado o diagrama tipo caixa do desvio em função das categorias de espessura.

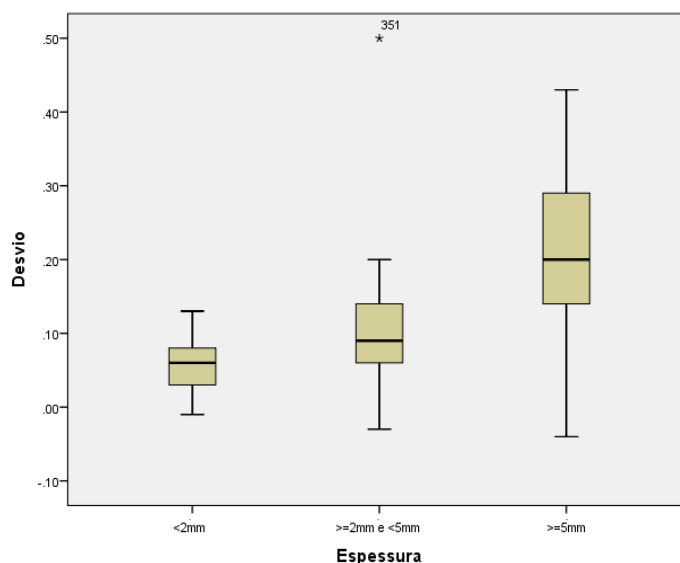


Fig. 27 - Diagrama tipo caixa do desvio em função das categorias de espessura

O diagrama tipo caixa da Fig. 27 ilustra como o aumento da espessura influencia negativamente o desvio, já que os seus valores e a variabilidade dos mesmos tornam-se superiores. Esta observação tem lógica tendo em conta o constatado na secção 2.4.6, sobre o corte de alta espessura, que requer mais energia, o que faz aumentar a ZAT. Também com o aumento da espessura qualquer perturbação a nível ótico vai ter mais efeito, e tipicamente, a criação de rebarba é superior. Todos estes aspetos influenciam a qualidade do corte e tornam cada vez mais crítico o corte à medida que a espessura aumenta.

Matéria prima

A seguinte Tabela 5 mostra as estatísticas descritivas do fator matéria prima e seus níveis, nomeadamente ferro e aço. Verifica-se que existem mais observações de aço do que de ferro, ainda que, a diferença seja reduzida.

Tabela 5 - Tabela de estatísticas descritivas referentes ao Fator Matéria Prima

Matéria Prima		Observações		Variável Dependente (Desvio)	
		Frequência absoluta	Frequência relativa (%)	Média	Desvio Padrão
Válido	Ferro	247	44.3	0.103	0.1058
	Aço	310	55.7	0.1148	0.079
	Total	557	100		

A Tabela 5 mostra ainda que, embora a média dos desvios de corte para o ferro seja ligeiramente inferior, o desvio padrão para esta matéria prima é superior, ou seja, os desvios de corte de ferro são em média melhores do que os de corte de aço, embora exista uma superior dispersão dos dados.

No diagrama tipo caixa da Fig. 28 facilmente se verificam as amplitudes dos intervalos de cada categoria deste fator.

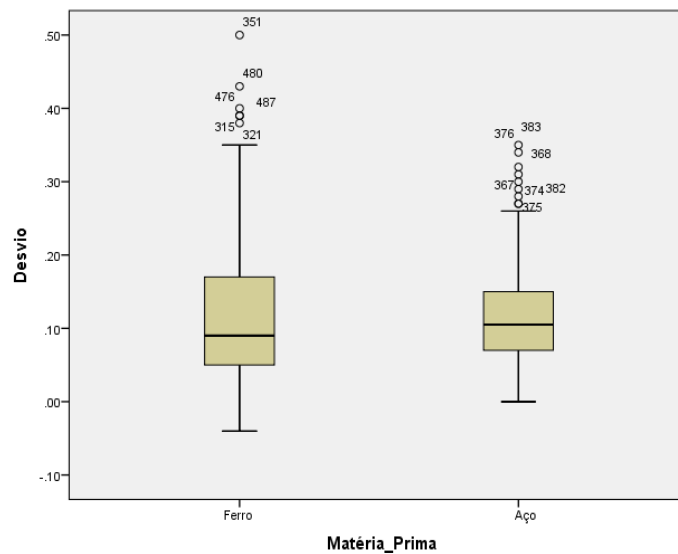


Fig. 28 - Diagrama tipo caixa do desvio em função das categorias de matéria prima

Na Fig. 28, verifica-se que, tanto o intervalo de variação como o tamanho da caixa que contém o segundo e terceiro quartis, e mesmo o número de "outliers", são superiores para o ferro, o que indica que o processo é menos estável para esta matéria prima. Isto pode dever-se à diferença de corte entre O_2 e N_2 como gases de assistência. Na secção 2.4.5 é referido que o oxigénio facilita o corte em termos energéticos, principalmente quando aplicado em ferro, devido às reações exotérmicas de oxidação. No entanto a qualidade de corte sofre perdas devido às tensões e forças de cisalhamento existentes, bem como, aumenta a ZAT, e o fluxo de radiação tende a criar rebarba também devido ao excesso de calor das reações. Tipicamente a fenda de corte aumenta com o oxigénio e a melhor qualidade encontra-se no Nitrogénio, que a Marsilinox usa no corte de aço. Era esperado verificar-se um maior intervalo de variação para as observações do ferro.

4.2 Caso pontual de lote não conforme

Na amostra, recolhida a 26/11/2013, para controlo de qualidade do lote da peça de nome INVAR (Fig. 29) de 2.5mm de espessura, registaram-se não conformidades para tolerâncias especificadas pelo cliente de $\pm 0.15\text{mm}$. A amostra recolhida foi de 50 unidades de uma encomenda de 1200 unidades.

Na Fig. 29 representa-se esquematicamente o produto em causa, e as medidas observadas.

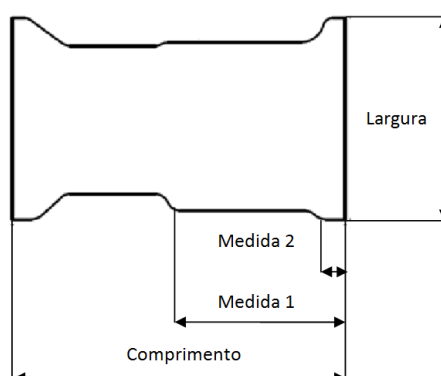


Fig. 29- Desenho da peça do lote não conforme e medidas registadas.
(Fornecido por Marsilinox e adaptado)

De seguida mostram-se os gráficos de tendência relativos às quatro medidas registadas para as 50 peças: comprimento (Fig. 30), largura (Fig. 31), medida 1 (Fig. 32) e medida 2 (Fig. 33), com indicação do valor nominal da especificação e das tolerâncias.

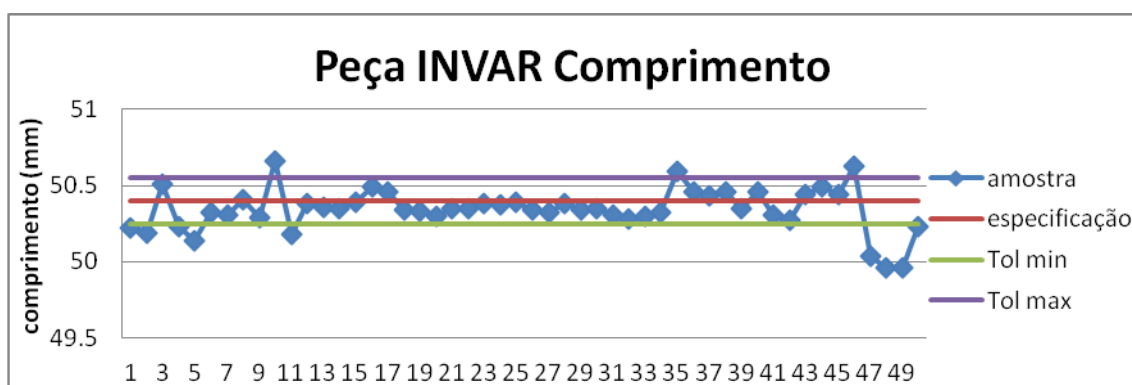


Fig. 30 - Observações do Comprimento da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias

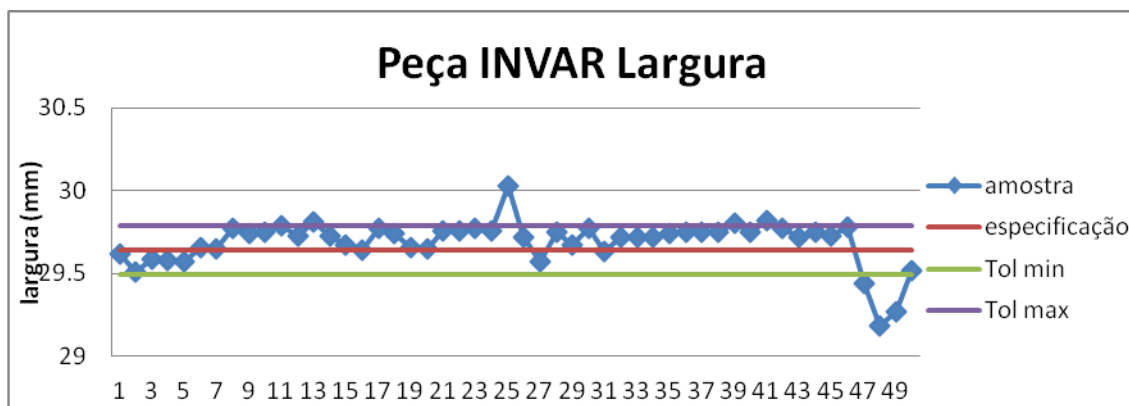


Fig. 31 - Observações da Largura da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias

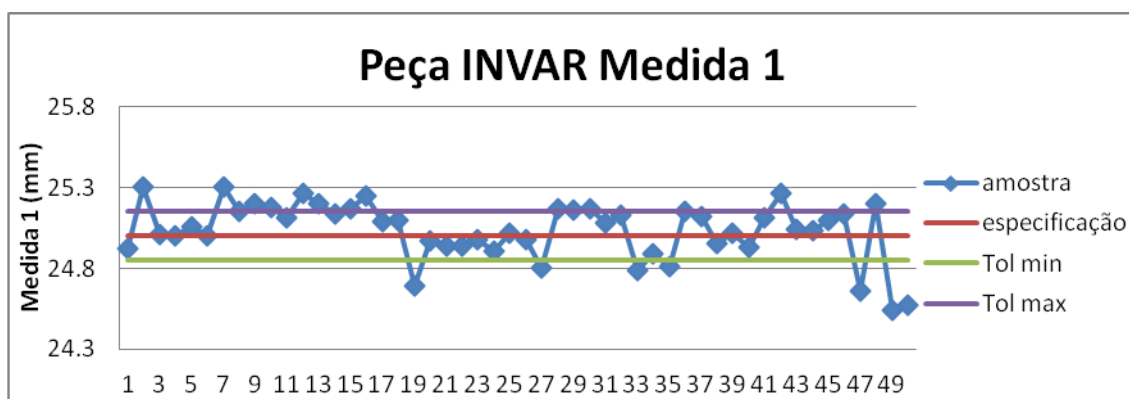


Fig. 32 - Observações da Medida 1 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias

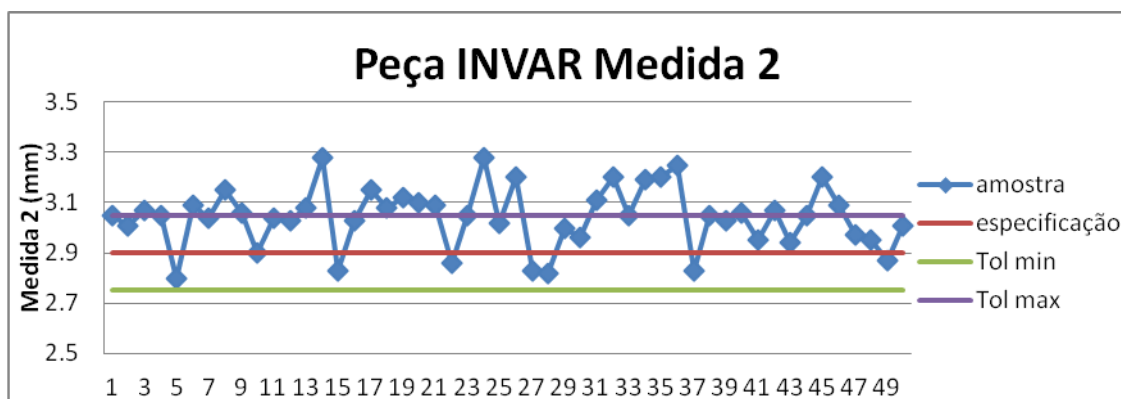


Fig. 33 - Observações da Medida 2 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias

Os gráficos anteriores mostram não conformidades em relação aos requisitos do cliente. Verifica-se que para as medidas 1 e 2 são observáveis mais pontos não conformes. Isto deve-se ao facto de serem medidas de menor dimensão e como a tolerância do cliente é fixa e não em percentagem, é mais facilmente ultrapassada em situações onde é necessária maior precisão e esta não existe. Avaliando a mesma amostra com a tolerância de corte de 5% da empresa, verifica-se que as não conformidades se verificam ainda nas medidas pequenas, como mostra o exemplo representado na Fig. 34. Para tolerâncias em percentagem, esta é mais pequena para medidas pequenas e superior para medidas maiores, sendo que, tolerâncias superiores não devem dar origem a tantas não conformidades. Assim com este caso não conforme, decidiu-se que o objeto de estudo seriam peças de medidas relativamente pequenas, que é onde se identificam os maiores problemas relativamente a medidas fora das tolerâncias (peças não conformes).

Observam-se no gráfico seguinte (Fig. 34), não conformidades na mesma amostra, para uma das medidas mais reduzidas (medida 2), com a tolerância da Marsilinox de 5%, para 2,9 mm de especificação, ou seja, uma tolerância de $\pm 0,145$ mm.

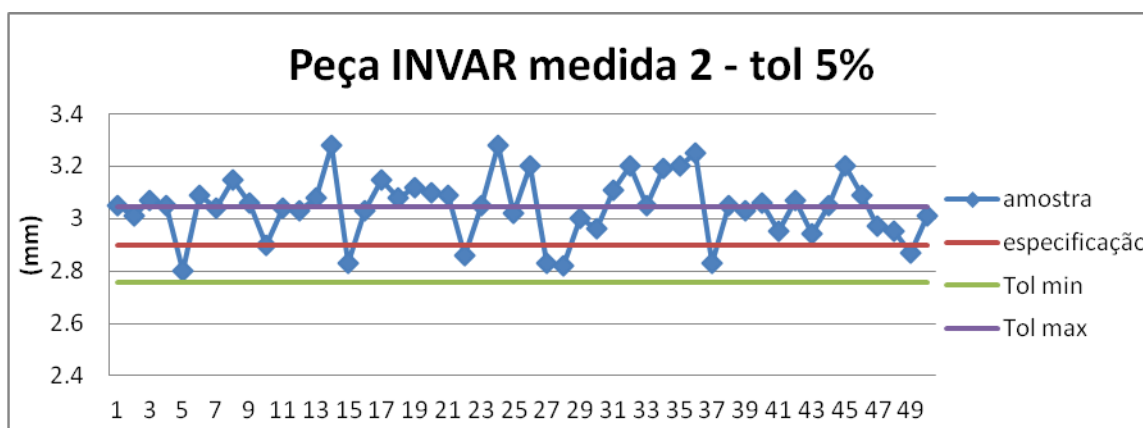


Fig. 34 - Observações da Medida 2 da Peça INVAR, com especificação e tolerâncias ($\pm 5\%$)

4.2.1 Estatísticas para o caso de um lote não conforme

Para o tratamento de um problema de qualidade devemos começar por analisar algumas estatísticas descritivas (Tabela 6) para tentar perceber o que está desenquadrado no problema.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas relativas à amostra das peças INVAR

Peça INVAR	Especificação	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Comprimento	50.04	50	49.96	50.66	50.3432	0.13911
Largura	29.64	50	29.18	30.03	29.69	0.13506
Medida 1	25	50	24.54	25.3	25.0338	0.17715
Medida 2	2.9	50	2.8	3.28	3.0428	0.11932

Pode-se observar que para a medida 2, a própria média quase atinge a tolerância máxima de 3,045mm. O desvio padrão da medida 1 é bastante alto comparado com os das restantes medidas, o que significa que existe uma maior dispersão dos valores para esta medida, quando comparada com as outras.

Procedeu-se de seguida ao teste à normalidade da distribuição da amostra, representado na Tabela 7.

Tabela 7 - Testes à Normalidade da distribuição das variáveis referentes às dimensões da peça INVAR

Peça INVAR	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatísticas	df	Sig.	Estatísticas	df	Sig.
Comprimento	0.138	50	0.018	0.943	50	0.018
largura	0.228	50	0	0.819	50	0
medida2	0.117	50	0.083	0.962	50	0.107
medida1	0.106	50	.200 [*]	0.931	50	0.006

Esta análise é feita segundo o teste do K-S Lillefors. Para as variáveis comprimento e largura rejeita-se a hipótese nula para o teste à normalidade, visto o valor de prova, segundo o teste de K-S Lillefors, ser inferior a 0.05 para essas mesmas variáveis, ou seja, não há normalidade. Os valores de prova para o mesmo teste elaborado à medida 1 e à medida 2 são superiores a 0.05, não se rejeitando, assim, as hipóteses nulas de normalidade, ou seja assume-se que estas variáveis seguem distribuições aproximadamente normais.

De seguida, na Tabela 8, representam-se os resultados do cálculo do índice de capacidade do processo para este lote.

Tabela 8 - Índices de capacidade do processo para amostra da peça INVAR

Peça INVAR	Cp	Cpk
Comprimento	0.36	0.22
Largura	0.37	0.25
Medida 1	0.28	0.22
Medida 2	0.42	0.02

O indicador "Cp" inferior a 1 indica que o processo de corte para a população correspondente à amostra considerada não é capaz, ou seja o processo não foi capaz para a execução de nenhuma destas medidas. Já o "Cpk" inferior ao "Cp" é indicador de um processo descentrado, como acontece para todas as medidas da amostra. O processo é então não capaz e descentrado para todas as medidas desta amostra.

4.3 Caso de uma encomenda produzida em dois lotes

Encomendas com um elevado número de peças, como num caso de 4000 unidades requisitadas, eram muitas vezes cortadas à noite e raramente no mesmo dia. Estes casos traziam a oportunidade de tentar perceber o que poderia influenciar o corte da mesma matéria prima e espessuras, em dias diferentes.

Estão em causa 2 lotes, cada um com 40 unidades amostrais. Os lotes nº14 e 16, representados na Fig. 35, são referentes à mesma ordem de compra, no entanto esta foi separada em 2 lotes de produção por ser bastante extensa. Assim passou a regime noturno, sendo executada em 2 dias diferentes para não perturbar a produção.

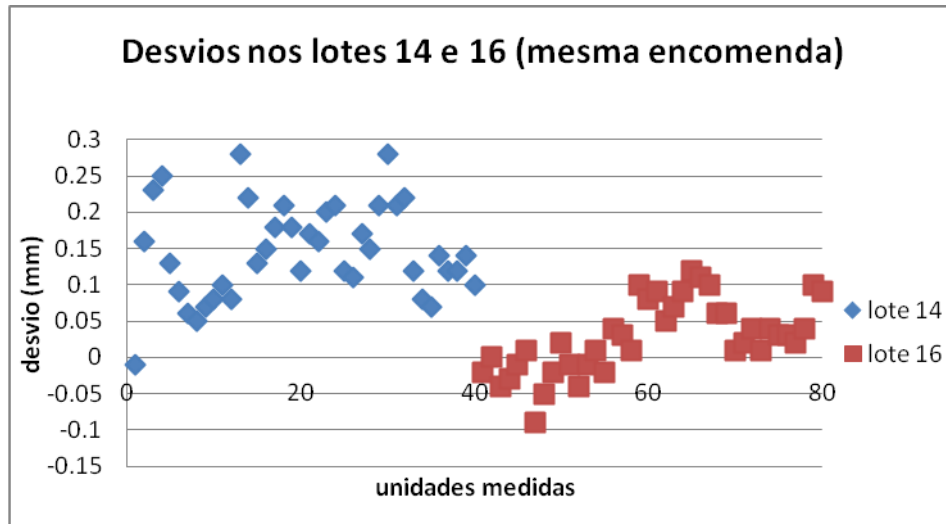


Fig. 35 - Gráfico relativo aos desvios em dois lotes da mesma encomenda

Sendo a mesma encomenda, sabe-se que a matéria prima e a espessura não se alteram. Observando os níveis registados por lote na tabela representada por cabeçalho na Fig. 23., pôde verificar-se que dos três fatores referidos anteriormente, entre os lotes 14 e 16, apenas se alterou o "Armazém".

Procedeu-se, então, à realização de um teste t de "Student" para averiguar se as diferenças verificadas entre os lotes eram significativas. Neste caso trata-se de um teste bilateral, em que se definem as seguintes hipóteses:

H_0 – Não existe diferença entre as médias do desvio para os dois lotes.

H_1 – Existe diferença entre as médias do desvio para os dois lotes.

Apresentam-se, em seguida, as tabelas das estatísticas dos grupos (Tabela 9) e do teste t de "Student" (Tabela 10).

Tabela 9 - Estatísticas dos grupos

	lote	N	Média	Desvio padrão
desvio	14	40	.1465	.06526
	16	40	.0285	.04969

Tabela 10 - Teste t à diferença de médias entre os desvios dos dois lotes da mesma encomenda

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
desvio	Equal variances assumed								Lower	Upper
		2.956	.090	9.098	78	.000	.11800	.01297	.09218	.14382

O teste *t* de "Student", representado na Tabela 10, mostra que as diferenças entre os lotes são significativas, tendo-se assumido igualdade de variâncias (o valor de prova do teste F é superior a 5%, mais concretamente, 9%). Assim, segundo o valor de prova inferior a 0.0005, muito inferior aos 5% de significância considerada, rejeita-se a hipótese nula e escolhe-se a hipótese alternativa, que indica que existe diferença entre as médias do desvio para as duas amostras. Uma das causas para estas diferenças pode então ser, a alteração dos níveis do armazém entre os dois lotes em causa. A chapa do lote catorze estava armazenada na vertical e produziu desvios maiores do que o lote 16, de chapa armazenada na horizontal.

4.4 Antes e depois da limpeza de uma lente

A limpeza da lente de foco, é também um fator interessante a estudar, já que a lente permite concentrar a radiação necessária num ponto de foco e sem esta não é possível o corte. Os lotes 5 e 11 estão separados pela primeira limpeza de lente registada no trabalho. Note-se que os lotes em causa não se referem à produção imediatamente antes e depois da limpeza, mas sim dos lotes considerados para este trabalho que mais se aproximam da data da mesma. A Fig. 36 representa as observações destes dois lotes. A nível gráfico é possível observar diferenças nos desvios em ambos os lotes, sendo que esta primeira amostra,

recolhida depois da limpeza, mostra desvios inferiores em relação à amostra recolhida antes da mesma, o que sugere que houve uma melhoria.

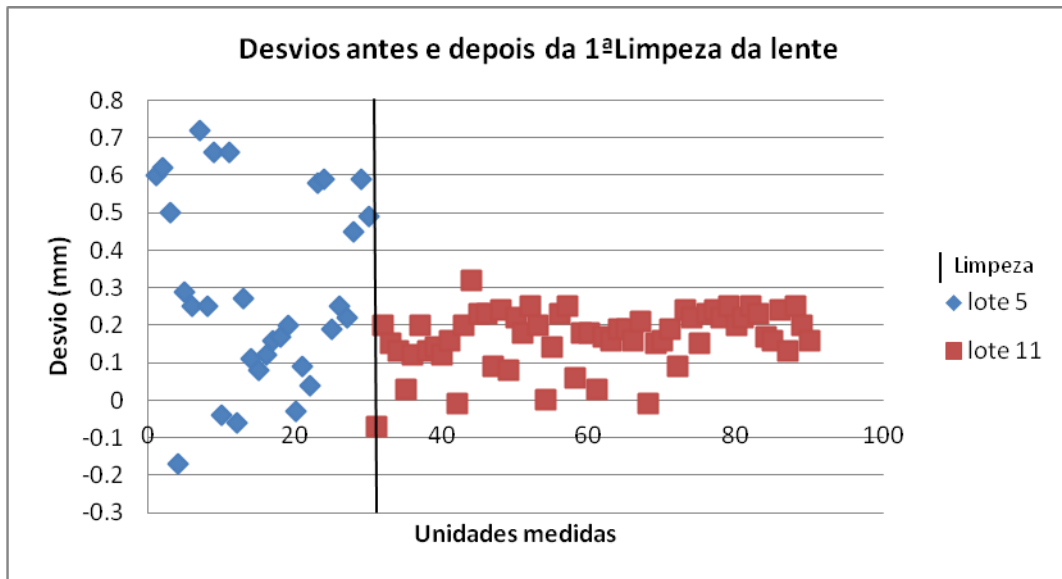


Fig. 36 - Gráfico relativo aos desvios antes e depois da 1ª limpeza da lente

Para averiguar se essas diferenças são significativas executou-se um teste t de "Student" (Tabela 12). Este caso trata-se de um teste unilateral, considerando-se as seguintes hipóteses:

H_0 – Não existe diferença entre as médias de desvio dos dois lotes.

H_1 – A média do desvio do lote 11 é inferior à do lote 5.

Representam-se em seguida as tabelas das estatísticas dos grupos (Tabela 11) e do teste t de "Student" para a 1ª limpeza da lente de foco (Tabela 12).

Tabela 11 - Estatísticas dos grupos

Limpeza		N	Média	Desvio padrão
desvio	Antes	30	.2950	.25254
	Depois	60	.1672	.07669

Tabela 12 - Teste t à diferença entre as médias dos desvios de dois lotes produzidos antes e depois da 1ª limpeza de lente

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
desvio	Equal variances not assumed	69.778	.000	2.711	31.703	.011	.12783	.04716	.03174	.22393

O SPSS faz por definição um teste bilateral. Para se obter o valor de prova para o teste unilateral divide-se o mesmo por 2. Neste caso o valor de prova será $0.011/2=0.0055$.

Neste teste não se assume igualdade de variâncias (valor de prova para o teste F inferior a 0.0005). Nesta condição, o valor de prova do teste t é inferior a 0.05, o que indica que as diferenças entre as amostras dos lotes em causa, são estatisticamente significativas.

Passando agora à 2ª limpeza realizada, ainda se observam diferenças a nível gráfico, embora menores, quando se compara com a 1ª limpeza. A Fig. 37 representa os desvios das amostras retiradas de dois lotes produzidos antes e depois da desta 2ª limpeza.

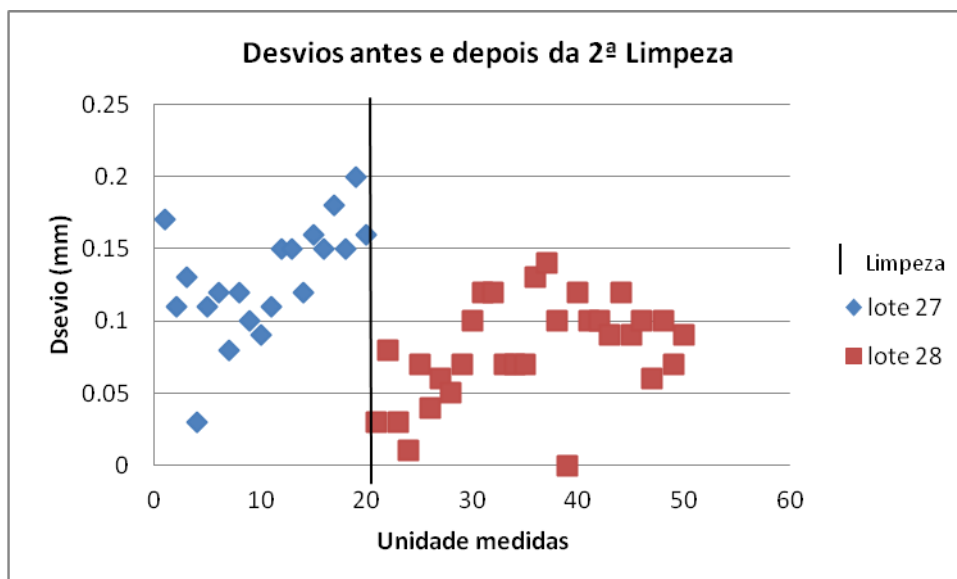


Fig. 37 - Gráfico relativo aos desvios antes e depois da 2ª limpeza da lente

Pode verificar-se que, depois desta limpeza da lente, houve também uma redução dos desvios do lote 27 para os do lote 28, ainda que inferior.

Em seguida representam-se as tabelas das estatísticas dos grupos (Tabela 13) e do teste *t* de "Student" (Tabela 14) idêntico ao acabado de descrever, mas desta vez referente à 2ª limpeza da lente de foco.

Tabela 13 - Estatísticas dos grupos

Limpeza		N	Mean	Std. Deviation
desvio	Antes	20	.1295	.03900
	Depois	30	.0800	.03494

Tabela 14 - Teste *t* à diferença de médias entre os desvios de dois lotes produzidos antes e depois da 2ª limpeza de lente

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
desvio	Equal variances assumed	.162	.689	4.685	48	.000	.04950	.01057	.02826	.07074

Assume-se igualdade de variâncias (valor de prova do teste F superior a 5%). O valor de prova para o teste unilateral será inferior a 0.00025. Assim, segundo este valor de prova, o teste *t* de "Student" da Tabela 14, mostra que também a segunda limpeza resultou em diferenças significativas para os lotes considerados antes e depois da mesma.

Podemos então concluir que as limpezas da lente têm um efeito estatisticamente significativo para o processo. Como podemos verificar, em ambos os casos, depois da limpeza da lente os desvios registados diminuem significativamente, o que vai de encontro ao referido nas secções 2.4.8 e 3.3.2, que mencionam que a melhor qualidade de corte é efetuada com uma lente limpa. Sabendo ainda que as limpezas foram efetuadas com intervalo de 2 meses de uma para a outra, e que os resultados da segunda são menos significativos que os da primeira, recomenda-se encurtar esse intervalo de tempo, mas apenas o suficiente para que as mesmas limpezas não deixem de ser significativas. Interessa que as limpezas sejam significativas no processo, para que mantenham o seu

valor, além de que encurtar o intervalo de tempo, implica limpezas mais frequentes e consequentemente, paragens na produção mais frequentes.

4.5 Estudo da influência dos fatores selecionados no desvio de corte

Nesta secção proceder-se-á à análise de variância com os fatores selecionados, já referidos anteriormente: Matéria Prima, Armazém e Espessura. Para isso há que ter em conta as 3 condições, referidas na secção 2.1.4, que asseguram a sua aplicabilidade.

As observações efetuadas das peças medidas, foram recolhidas de forma aleatória ou independente, podendo, assim, assumir-se que os erros também são independentes. Verificou-se que os erros não seguem uma distribuição normal, mas dado que a dimensão da amostra é grande, assumiu-se que o Teorema do Limite Central se aplica (Guimarães e Cabral, 2007). Por outro lado, verificou-se que não existe homogeneidade de variâncias. Esta existe apenas em análise univariada, para o fator Armazém. Apesar de falhar uma das condições para a validação da ANOVA, sendo este o objetivo do trabalho, procedeu-se à sua execução para pesquisa e maior compreensão dos efeitos dos fatores. Assim, não existe total fiabilidade nestes resultados, mas espera-se a sua utilidade na sugestão de melhorias à empresa e para trabalhos futuros.

O primeiro lote de 40 unidades não é considerado na ANOVA por ser registado antes da primeira limpeza. Assim o total de registos será 517 em vez dos iniciais 557.

A Tabela 15 apresenta os fatores utilizados e os respetivos níveis.

Tabela 15 - Fatores e níveis consideradas para a ANOVA

Fatores	Níveis	Identificação do nível	N
Matéria prima	1	Ferro	227
	2	Aço	290
Armazém	1	Na Vertical	282
	2	Na Horizontal	235
Espessura	1	< 2mm	195
	2	>=2mm e < 5mm	230
	3	>=5mm	92

A Tabela 16 representa os grupos de dados das interações entre os níveis dos três fatores selecionados e a quantidade de observações em cada um, sendo que, os grupos de dados sem observações não estão representados.

Tabela 16 - Grupos de dados com observações

Matéria Prima - Armazém - Espessura			N
Ferro	Na Vertical	< 2mm	45
		>=2 e <5mm	60
		>=5mm	52
	Na Horizontal	>=2 e <5mm	70
Aço	Na Vertical	< 2mm	50
		>=2 e <5mm	35
		>=5mm	40
	Na Horizontal	< 2mm	100
Total			517

A Tabela 17 apresenta os resultados da Análise de Variância feita aos desvios de corte (variável dependente) com os fatores Matéria Prima (2 níveis), Armazém (2 níveis) e Espessura (3 níveis).

Tabela 17 - ANOVA

Fatores	Tipo III Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	F	Sigma
Matéria prima	.008	1	1.820	.178
Armazém	.053	1	11.772	.001
Espessura	1.109	2	122.602	.000
Matéria prima * armazém	.002	1	.411	.522
Matéria prima * espessura	.066	2	7.314	.001
Armazém * espessura	.318	1	70.303	.000
Matéria prima * armazém * espessura	.000	0	.	.
Total	10.569	517		

Não foi possível verificar se o efeito da interação entre os 3 fatores é significativo, dada a ausência de dados relativos a três grupos de dados. Dois destes grupos, são o primeiro e o terceiro níveis de espessura para ferro na horizontal, e o terceiro grupo é o aço na horizontal igual ou superior a 5mm, que não se encontram na Tabela 16. No entanto, é possível tirar conclusões sobre os fatores aos pares. Segundo a tabela ANOVA os efeitos do armazém e da espessura são significativos no processo, ao contrário do efeito da matéria prima. Pela análise dos diagramas tipo caixa de cada fator, feita na secção 4.1.3, estes resultados já eram esperados. No que diz respeito às interações dos fatores dois a dois, verifica-se que os efeitos são estatisticamente significativos para as interações entre a espessura e a matéria prima e entre a espessura e o armazém. Entre a matéria prima e o armazém, não foi possível identificar interação com significância estatística.

Em seguida representam-se os gráficos das interações que se revelaram estatisticamente significativas entre os fatores, nomeadamente, entre armazém e espessura na Fig. 38, e entre matéria prima e espessura na Fig. 39.

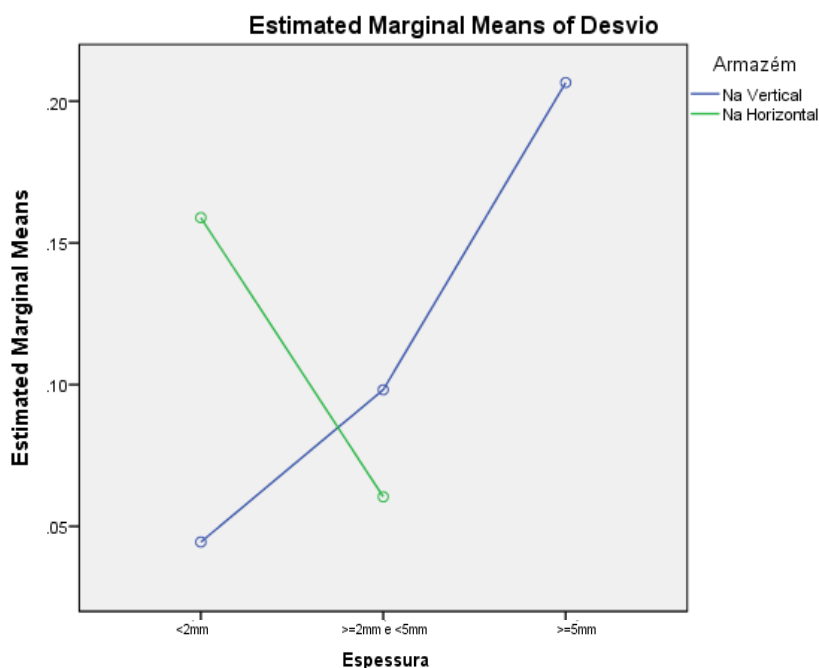


Fig. 38 - Gráfico dos valores médios para os dois armazéns e as três categorias de espessura consideradas

Como já foi referido, na análise dos grupos de dados, verificou-se ausência de dados em três grupos. Estes três grupos sem dados têm em comum um nível de um fator, que é o

armazém na horizontal, por isso se verifica que não é possível fazer o teste ao efeito da interação entre os três fatores, nem existe representação gráfica para a espessura igual ou superior a 5mm para o armazém na horizontal (Fig. 38). Ainda assim é possível tirar algumas conclusões, nomeadamente que a empresa pode optar por armazenar na vertical chapa inferior a 2mm de espessura e na horizontal, chapa entre 2mm (incluindo) e 5mm. Para chapa superior a 5mm de espessura inclusive, pode apenas referir-se que se confirma o decrescer da qualidade de corte com as maiores espessuras e para o armazém de chapa na vertical. Neste seguimento Verifica-se, ainda que, sabendo que as maiores espessuras requerem maiores potências de corte e que a chapa na vertical ganha deformações que, em situação de corte, se assemelham a situação de corte inclinado, o que se vê no gráfico está de acordo com o referido no capítulo 2.4.7, nomeadamente, que o corte inclinado de chapa é muito afetado pela potência.

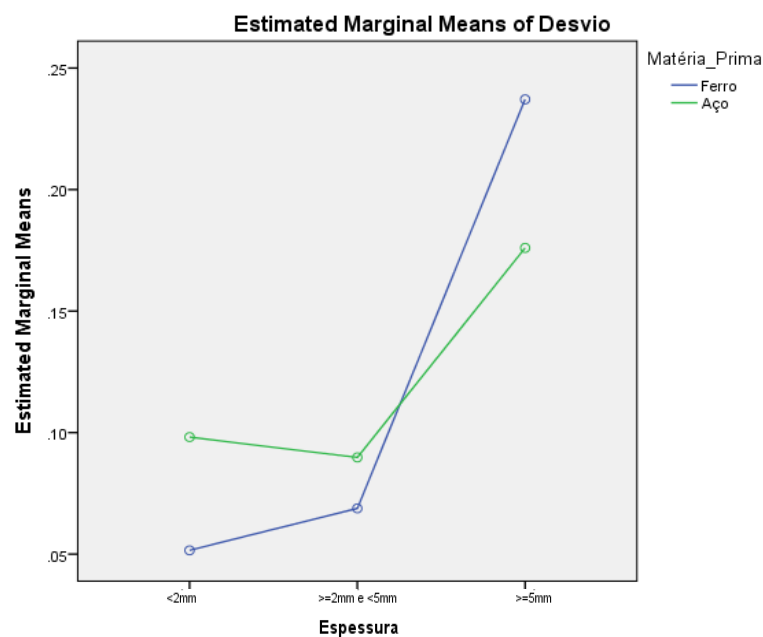


Fig. 39 - Gráfico dos valores médios para as duas matérias primas e as três categorias de espessura consideradas

No gráfico da Fig. 39 pode observar-se que as duas matérias primas sofrem perdas na qualidade de corte com o aumento da espessura, como seria de esperar, segundo o enquadramento teórico, ainda que para o aço se verifique uma pequena melhoria do primeiro para o segundo nível de espessura. Verifica-se ainda que, para espessuras até 5mm, o ferro é cortado com melhor qualidade, possivelmente pela facilidade de corte

transmitida pelo oxigénio para baixas espessuras. Refira-se que Golnabi e Bahar (2009) definiram as espessuras ótimas para corte de aço austenítico e ferrítico com oxigénio como sendo de 1 e 2 mm, sendo, que nesta situação fatores como a potência de corte e a pressão de gás devem ser relativamente baixos. A qualidade, no entanto, decresce bastante para espessuras superiores, o que pode ter a ver com o aumento da potência e pressão de gás necessárias para o seu corte, que pioram a qualidade do produto final. Relativamente à espessura e matéria primas recomenda-se então que, para evitar tal decréscimo da qualidade de corte, se aplique o nitrogénio como gás de assistência para ferro a partir dos 5mm de espessura que, teoricamente deve melhorar a qualidade de corte. No entanto, o corte de ferro deve ficar também limitado a uma espessura máxima inferior.

5. Conclusão

5.1 Conclusões e Sugestões de melhoria

Os objectivos deste projeto foram identificar as causas dos desvios de corte das peças produzidas em corte a laser, relativamente à especificação no desenho técnico e, com apoio em análises posteriores, sugerir ações que pudessem contribuir para a melhoria do processo. Considera-se que os objetivos foram cumpridos. A aplicação das ferramentas da qualidade para descobrir as causas do problema e a análise estatística dos dados recolhidos, permitiram compreender o comportamento de alguns fatores no processo, e, a seleção de três deles para efetuar uma análise de variância. A característica estudada foi o desvio de corte, ou seja, o desvio das cotas especificadas em desenho técnico. Os fatores e níveis considerados são o Armazém de chapa, na vertical e na horizontal, a Matéria Prima, ferro e aço, e a Espessura da peça, para a qual são definidos três níveis: "<2mm", ">=2mm e <5mm" e ">=5mm"

Através da análise do histograma dos desvios e da tabela dos dados recolhidos de cada fator observa-se que estes valores podem estar em parte a ser afetados pela fenda de corte definida nos programas, sendo possível que a fenda definida esteja a retirar material que não é suposto do produto final. A empresa deve verificar esta situação.

Pode ainda concluir-se através dos testes t de "Student", que as 2 limpezas executadas resultaram numa melhoria estatisticamente significativa no processo. Também através do mesmo teste, mas para a situação da encomenda dividida em 2 lotes, podemos concluir que existiram diferenças significativas no corte, que podem estar associadas a diferentes condições de armazém.

Foi ainda efetuada uma correlação entre as especificações e desvios das observações, da qual se concluiu que existe uma pequena correlação entre os mesmos.

Foi considerado para análise um lote não conforme, registado antes da 1ª limpeza da lente. Concluiu-se que o processo para este lote não foi normal, para duas medidas em

quatro, nem capaz ou centrado, para todas as medidas registadas, resultando em grande quantidade de observações não conformes.

No que diz respeito à utilização da técnica de Análise de Variância, não foi possível a sua total validação, visto que não se verifica a homogeneidade dos resíduos, o que faz com que os seus resultados não sejam totalmente fiáveis. Foi no entanto possível tirar algumas conclusões com base nestes resultados, nomeadamente que, os efeitos do armazém e da espessura, e, os efeitos das interações entre a espessura e a matéria prima, e, entre a espessura e o armazém, são estatisticamente significativos.

Com base na interpretação dos resultados da Análise de Variância deixam-se as seguintes sugestões de melhoria:

- A empresa pode optar por armazenar na vertical, chapa inferior a 2mm de espessura e na horizontal, chapa entre 2mm (incluindo) e 5mm.
- Relativamente ao armazém de chapa na vertical recomenda-se a aplicação de proteção de PVC e alteração da estrutura que suporta a chapa, para redução dos seus efeitos no corte.
- Para espessuras de ferro iguais ou superiores a 5mm recomenda-se o corte com nitrogénio, ainda que este limite o corte desta matéria prima a espessuras máximas inferiores.

5.2 Limitações

Algumas limitações ao estudo verificaram-se a propósito da análise dos fatores que influenciam o corte laser. O uso das encomendas para corte de chapa de latão não foi possível, já que estas chapas eram sempre fornecidas pelo cliente, para concretizar apenas o serviço de corte. Como tal, a expedição era feita com o produto ainda na chapa, com o propósito de devolver a chapa usada, sem se perderem peças, não sendo possível recolher amostras. A inclusão do alumínio como matéria prima não foi possível devido ao reduzido número de encomendas de peças que utilizam esta matéria prima. A distinção dos aços quanto à liga também não foi considerada, pois a criação de mais níveis para o fator material iria requerer um maior número de observações para a elaboração da análise de

variância. Já no caso dos restantes fatores de corte, como é o caso da velocidade de corte, tempo de penetração e pressão do gás de assistência, não foi possível a análise devido a inacessibilidade da informação relativa a estes parâmetros no momento do controlo de qualidade, pois são parâmetros apenas trabalhados na máquina e no programa não fica qualquer registo.

5.3 Trabalho futuro

Uma maior recolha de dados, relativamente à amostra, e a elaboração de uma Análise de Variância validada, seria o primeiro de muitos trabalhos, uma vez que não foi possível neste caso de estudo. A realização de desenhos de experiências, considerando os fatores abordados neste relatório seria o próximo passo. O tipo de matéria prima é um fator fortemente analisado na bibliografia. São feitas comparações entre certos materiais bem como são efetuados estudos físicos, químicos e de corte a laser em materiais de interesse. Dificilmente os estudos atuais abordam todos os materiais metálicos para todos os parâmetros de corte, e embora os mais utilizados no mercado e neste trabalho sejam bem abordados, segundo Cekic (2014), há potencial para trabalho futuro recorrendo ao desenho de experiências para o corte a laser de outros metais e para diferentes ligas. Seria ainda interessante avaliar os restantes parâmetros de corte ainda para o ferro e aço, nomeadamente a pressão de gás, tempo de penetração do laser, velocidade e potência de corte, e fenda de corte (programada ou teórica). Com o desenho de experiências aplicado a estes parâmetros, seria possível orientar a programação por espessura e matéria prima, para as melhores combinações de valores destes parâmetros, aumentando a qualidade de corte. O diâmetro do bocal e distância focal não estão diretamente relacionados com a programação, necessitando de intervenção humana para a alteração dos seus níveis, no entanto, e apesar destas intervenções causarem incómodo na produção, seria também interessante abordar estes fatores num desenho de experiências, a fim de se encontrarem os seus melhores níveis. Corte de chapa com e sem proteção de PVC, pode também ser um fator a incluir em desenho de experiências. Seria também benéfico para a empresa estudar o efeito das limpezas. Isto seria útil para um planeamento das mesmas ao longo do tempo, ou seja, seria possível avaliar quanto tempo dura o efeito de uma limpeza e quando é que deverá ser feita nova limpeza, minimizando assim o intervalo de tempo da lente com sujidade, mas mantendo os efeitos significativo dessas limpezas nas lentes.

Referências Bibliográficas

- Baumeister, M., K. Dickmann e T. Hoult (2006). Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets. *Applied Physics - Materials Science & Processing*. 85, 121-124
- Cekic, A., D. Bejic-Hajdarevic, M. Kulenovic e A. Omerspahic (2014). CO2 Laser Cutting of Alloy Steels using N2 Assist Gas. *Procedia Engineering*. 69, 310-315
- Chen, S.L. (1996). In-process high power CO₂ laser beam position sensing. *Optics & Laser Technology*. 28, 193-201
- Chen, S L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 88, 57-66
- Dubey, A.K. e V. Yadava (2008). Laser beam machining - A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 48, 609-628
- Evans, J.R. e W.M. Lindsay (2010). *The Management and Control of Quality*, South-Western College.
- Ganhão, F. (1988). *Custos da Qualidade*, Instituto Português da Qualidade, 1ªEdição
- Golnabi, H. e M. Bahar (2009). Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting. *Optics & Laser Technology*. 41, 454-460.
- Guimarães, R.C. e Cabral, J.A.S. (2007), *Estatística*, McGraw Hill.
- Hu, J., X Qiu, Z. Zhang e H. Shen. (2012). Influence of oxidation on flow structure in laser-oxygen cutting. *Journal of Applied Physics*. 112.
- Imae, M. (1997). *Gemba Kaizen - Estratégias e Técnicas do Kaizen no Piso de Fabrica*. Instituto IMAM, São Paulo.
- Karatas, C., O. Keles, I. Uslan e Y. Usta (2006). Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. *Journal of Materials Processing Technology*. 172, 22-29

- Madić, M.J. e M.R. Radovanović. (2012). Analysis of the Heat Affected Zone in CO2 Laser Cutting of stainless steel. *Thermal Science*. 16, 363-373
- Maroco, J. (2003), *Análise Estatística - com utilização do SPSS*, Edições Sílabo.
- Meijer, J., (2004). Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *Journal of Materials Processing Technology*. 149, 2-17
- Murteira, B. e Antunes, M., (2012), *Probabilidade e Estatística*, Escolar Editora, Volume 2.
- Ozaki, H., Y. Koike, H. Kawakami e J. Suzuki (2012). Cutting Properties of Austenitic Stainless Steel by Using Laser Cutting Process without Assist Gas. *Advances in Optical Technologies*. 8,234-321.
- O'Neill, W. e J.T. Gabzdyl (2000). New developments in laser-assisted oxygen cutting. *Optics and Lasers in Engineering*. 34, 355-367.
- Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*. 58, 240-242.
- Rajaram, N., J. Sheikh-Ahmad e S.H. Cheraghi (2003). CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 43, 351-358.
- Wetherill, G.B. e Brown D.W. (1991). *Statistical Process Control - Theory and Practice*. Chapman & Hall.
- Yilbas, B.S. (2008). Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations. *Journal of Materials Processing Technology*. 201, 285-290.
- Yilbas, B. S. e A. Z. Sahin (1995). Oxygen assisted laser cutting mechanism - A laminar boundary layer approach including the combustion process. *Optics & Laser Technology*, 27 No 3.
- Yilbas, B.S. (2004). Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 155-156, 2106-2115

Yilbas, B.S., C. Karatas, I. Uslan, O. Keles, Y. Usta, Z. Ylbas e M. Ahsan (2008). Wedge cutting of mild steel by CO2 laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting. *Optics & Lasers in Engineering* 46, 777-784

Yilbas, B.S, A. F. M. Arif e B. J. A. Aleem (2010). Laser cutting of sharp edge: Thermal stress analysis. *Optics and Lasers in Engineering*. 48, 10-19

Yilbas, B.S. (1997). Parametric study to improve laser hole drilling process. *Journal of Materials Processing Technology* 70. 264-273

(1996). Zinc selenide lenses for high-power CO2 lasers, News Update, Coherent Inc. & Air Products plc. *Optics & Laser Technology*. 28, 8

Sites consultados

www.esab-cutting.com (Consultado em 14-05-2014)

www.mate.com (Consultado em 15-03-2014)

www.wisegeek.org (Consultado em 16-06-2014)

www.steel.org (Consultado em 16-06-2014)

<http://worldstainless.org> (Consultado em 18/06/2014)

www.troteclaser.com (Consultado em 26/06 /2014)

science.howstuffworks.com (Consultado em 05/05/2014)

www.laserfocusworld.com (Consultado em 08/07/2014)

www.aip.org (Consultado em 17/05/2014)

www.sobreadministracao.com (Consultado em 23/09/2014)

